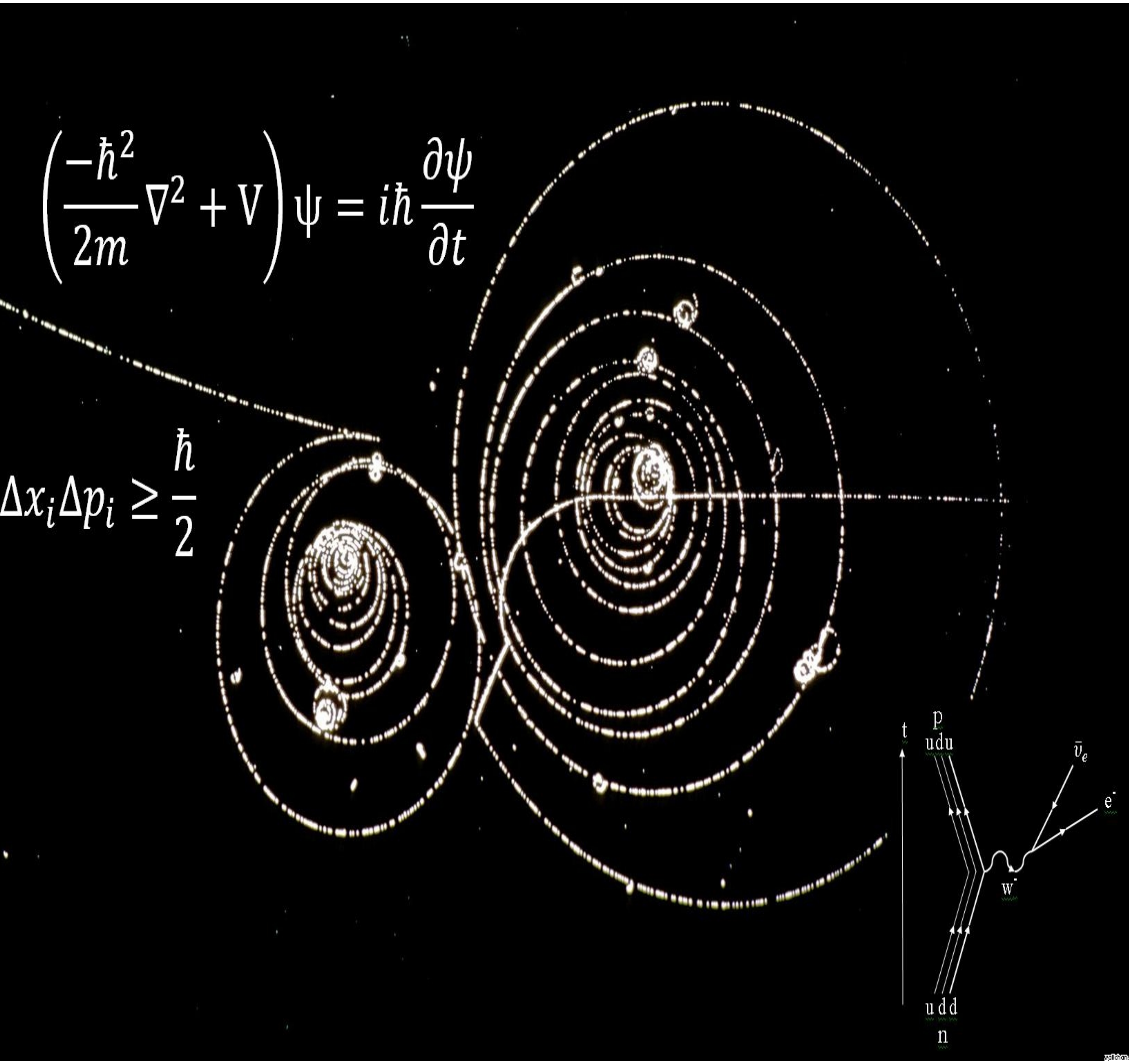
ميكانيكا الكم بين الفلسفة والعلم



يوسف البناي

المحتويات

مقدمة

توصف نظريتي الكم والنسبية عادة, كأعظم نظريتين في القرن العشرين. حيث تحمل كلتا النظريتين بين ثناياها شيئا من الغموض والإبهام. لكن نظرية الكم تحمل أفكارا لا يتردد القارئ الغير معتاد عليها بأن يصفها بالجنون, كأنسب وصف مناسب لها. إن النجاح العظيم الذي حققته هذه النظرية على المستوى المجهري, جعلت الآباء الأوائل لها والمختصين فيها يعيروا اهتماما إلى التبعات الخطيرة إذا ما أخذت النظرية بمعناها الحرفي. لقد كان فيزيائيوا ما قبل الكم يرصدون الجمل الفيزيائية على أساس أنها موجودة بشكل موضوعي هناك وأنا موجود هنا أقوم برصدها. كان العالم بالنسبة للفيزيائي أو الإنسان العادي موجود بشكل موضوعي مستقل سواء كان هناك من يرصده أو لا.

لكن نظرية الكم لها وجهة نظر أخرى بهذا الشأن. إن الراصد الذي يقوم بعميلة الرصد في المستوى المجهري, يخلق ثم يرى ما خلق. هذا ما تقوله لنا نظرية الكم, إن الطبيعة في أعمق أعماقها غير محددة سلفا, بل تنتظر راصدا ما ليقوم بعميلة الرصد ويحدد وضعا معينا للواقع**!**. وهناك من الفيزيائيين من يذهب أبعد من ذلك ويرى بأن الواقع لا وجود له بدون المشاهد الواعي**!!**, وهذا يذكرنا بمذهب وحدة الوجود القديم قدم الإنسان.

هناك الكثير بدون شك من الفلاسفة والمتصوفة الشرقيين منهم والغربيين من افتتن بمذهب وحدة الوجود, وقد أجهد بعضهم أنفسهم بتأليف كتب عديدة في ذلك المذهب. لكن مهما بلغ عدد المؤمنين بهذا المذهب ومهما بلغ عدد الكتب التي أولفت به, تبقى الحجج والأفكار التي قيلت به مبنية على أراء شخصية أو عقائد دينيه أو أراء فلاسفة حلموا بعالم مثالي. لكن الوضع مع نظرية الكم مختلف كثيرا, إن كنت الآن تجلس و بجوارك تلفاز أو كمبيوتر أو هاتف نقال أو حتى منزلي, فأن كل هذه الأشياء قامت بالأساس على نظرية الكم, أو الفهم الدقيق لسلوك الذرات. لذلك علينا أن نضع نتائج وتبعات هذه النظرية على محمل الجد. فمعظم الفيزيائيين بحسب معرفتي ليست لديهم عقيدة معينه أو مزاج شخصي معين حتى يقولوا كلاما يشبه الخرافة أو الخيال العلمي. إن بعض الآراء التي ستراها في هذا الكتاب, ستبدو لك غير علميه أوكأنها من شطحات العلم أو الجنون العلمي. لكن ضع في ذهنك دائما, بأن هذه الآراء تأتي من صميم التجارب ذاتها, كما سنرى.

لم يكن أمام فيزيائيوا القرن العشرين خيارات كثيرة ليبنوا صورة سير الكون من حولهم, فإما قبول صورة الكون الآلية كما صورها نيوتن و لابلاس, أو قبول الثورة الكمومية الجديدة. والآن وبعد مرور أكثر من قرن من الزمان على اكتشاف نظرية الكم, ما زال الكثير من الفيزيائيين يعيدون النظر في كل النتائج الغريبة التي تتولد من بين ثناياها.

يعرض هذا الكتاب تاريخ تطور نظرية الكم, منذ اكتشاف بلانك حتى نظرية العوالم المتعددة. و لا يخلوا هذا الكتاب من المعادلات الرياضية الموجزة نسبيا, لفهم النظرية بشكل واضح وجيد على المستوى الرياضي. لذلك يجب على القارئ أن يكون ملم بمبادئ الرياضيات, ليس أكثر من حساب التفاضل والتكامل. وكل ما هو معقد رياضيا في هذه النظرية لا يدخل ضمن هذا الكتاب, وقد يكون هذا الكتاب مفيد لمن هو مقبل على دراسة الفيزياء الحديثة. بعد الانتهاء من

الجانب العلمي سننتقل إلى الجاني الفلسفي, ولا يعني هذا بأن النظرية قد نشأت على جانبين, بل كل ما في الأمر أنها قد وجدت نفسها بلا حول ولا قوة أمام الفلسفة.

أخيرا سوف أكون ممتنا لمن يكتب رأيه أو ملاحظاته بخصوص هذا الكتاب على البريد الالكتروني التالي:

yousifalbanay@hotmail.com

يوسف البناي

القسم الأول

موجز لتطور نظرية الكم

الفصل الأول

بزوغ فكرة التكميم أو حل مشكلة الجسم الأسود

مقدمة

كانت آلية عمل الكون حتى نهاية القرن التاسع عشر تعمل على أروع ما يمكن, فبفضل أعمال نيوتن والعمالقة الذين سبقوه, صارت آلية عمل الكون مفهومة جيدا, ولا شيء فيها يدعوا للقلق. إن كل ما نحتاجه لمعرفة حالة الكون المستقبلية, هو معرفة شروطه الابتدائية فقط. لقد بات الكون أشبه بآله عملاقة, تعمل بدقة الساعة, لا يصيبها الخلل ولا الملل منذ أن أطلقت للعمل. فإذا ما علمنا عن موضع وسرعة كوكب أو نجم ما أو حتى ذرة شاردة في الكون في لحظة معينه, فانه بإمكاننا تحديد كل حركاته المستقبلية تحديدا دقيقا, بشرط أن نأخذ في الحسبان جميع التأثيرات الخارجية. بهذه الطريقة نستطيع من حيث المبدأ بواسطة استخدام قوانين الفيزياء تحديد حالة كل ما في الكون, من اكبر مجراته إلى اصغر ذراته. عندها ستكون صورة الكون المستقبلية ماثلة أمام أعيننا, تماما كالماضي. وفي ذلك يقول الرياضي اللامع لابلاس:

(يجب أن ننظر إذن, إلى الحالة الراهنة للكون كنتيجة لحالته السابقة وكسبب لحالته اللاحقة. فلو أن عقلا يمكنه أن يعرف, في لحظة من اللحظات, جميع القوى التي تحرك الطبيعة, وكل الأوضاع المتتالية التي تتخذها فيها الكائنات التي تتألف منها - أي الطبيعة - , ولو أن هذا العقل نفسه هو من الاتساع والشمول بحيث يمكنه أن يخضع هذه المعطيات للتحليل, فانه سيكون قادرا على أن يضم في عبارة رياضية واحدة حركات أكبر الأجسام في الكون وحركات اصغر و أدق الذرات, فلا شيء يكون بالنسبة إلى هذا العقل موضع شك, أن الماضي والمستقبل سيكونان, كلاهما, حاضرين أمام عينيه)*

لكن هذه الصورة الجميلة للكون لم تدم طويلا. لقد ظهرت مشكلتان شوهتا معالم تلك الصورة الرائعة, وباتت قوانيننا العظيمة غير قادرة على التوافق مع نتائج تلك المشكلتان. تعرف اليوم تلك المشكلتان باسم: معضلة الجسم الأسود, والتأثير الكهروضوئي. لقد كان حل هاتين المعضلتين بداية لثورة وانطلاقة جديدة في دنيا العلم, غيرت نظرتنا المعتادة إلى ذاك الكون الآلي إلى الأبد.

* أخذنا هذه الترجمة من كتاب, مدخل إلى فلسفة العلوم, العقلانية المعاصرة وتطور الفكر العلمي, الدكتور محمد عابد الجابري (بيروت: مركز دراسات الوحدة العربية, الطبعة السادسة, 2006)

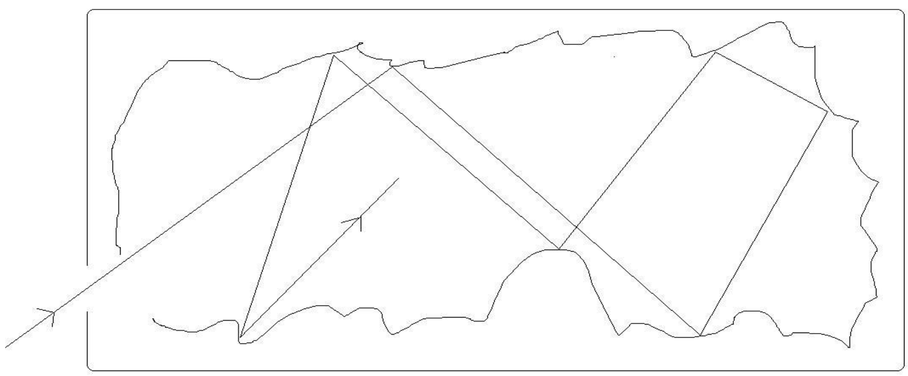
1-1 ما الجسم الأسود؟

كل الأجسام المحيطة بك بما فيهم أنت, تطلق إشعاع يسمى (الإشعاع الحراري), بشرط أن تمتلك تلك الأجسام درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق. هذا الإشعاع الحراري هو إشعاع كهرومغناطيسي عادي (ضوء). تعتمد كمية ونوعية هذا الإشعاع بشكل رئيسي على درجة حرارة الجسم المشع, فالجسم الذي يمتلك درجة حرارة عالية, يكون لدية تردد عالي [1] أو طاقة عالية, وطول موجي [2] قصير, والعكس صحيح.

إن كل الأجسام الحرارية لا تسخن من تلقاء ذاتها لكي تطلق إشعاع كهرومغناطيسي, بل تحتاج إلى مصدر خارجي يعطي ذرات الجسم طاقة حركية. فالحرارة ليست سوى تحرك جزيئات أو ذرات الجسم. إحدى طرق إثارة ذرات الجسم وإعطائها طاقة حركة تتم بواسطة تسليط ضوء خارجي عليه, حيث تقوم ذرات الجسم بامتصاصه ومن ثم إطلاق الإشعاع الحراري. إذن بهذه الطريقة يعتمد الإشعاع الحراري للأجسام, على التركيبة الداخلية للأجسام نفسها, وقدرتها على امتصاص الأشعة الساقطة عليه.

لا يوجد جسم قادر على امتصاص الأشعة الساقطة عليه ومن ثم إطلاقها بشكل كامل, سوى جسم واحد, وهو الجسم الأسود. جميع الأجسام تمتص الأشعة الساقطة عليها ولكن في نفس الوقت تعكس وتمرر البعض الأخر منها. لكن الجسم الأسود لا يعكس ولا يمرر أي شيء من الأشعة, بل يقوم بامتصاصها بشكل كامل, لذلك يطلق عليه اسم الجسم الأسود.

ولكن كيف يمكننا الحصول على مثل هذا الجسم في المختبر. في الحقيقة فكرته بسيطة جدا, نستخدم فرن أو تجويف داخلي, كما هو موضح بالشكل (1-1). تقوم الفكرة على إسقاط أشعة كهرومغناطيسية من فتحة التجويف, وبعد دخولها ستقوم بسلسلة من الانعكاسات الداخلية, وكلما



شكل (1-1)

تقوم فكرة عمل الجسم الأسود على إرسال شعاع ضوئي من فتحة صغيرة, وبعدها يقوم بانعكاسات كثيرة, مما يؤدي في النهاية إلى امتصاص وطلاق كاملين للإشعاع.

سقط الإشعاع على جزء داخل التجويف, يقوم هذا الجزء بامتصاص كمية من الإشعاع الكهرومغناطيسي. ولما كانت فرصة خروج الإشعاع من الفتحة ضئيلة جدا, سيمتص الإشعاع في النهاية بالكامل, ومن ثم يطلق بالكامل, ونحصل بهذه الطريقة على الجسم الأسود.

إن موضع الاهتمام في دراسة الجسم الأسود, هو خصائص الإشعاع المنبعث منه, كالشدة و التردد والطول الموجي. لقد استحوذ هذا الموضوع على اهتمام كثير من الفيزيائيين في نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين.

كانت المشكلة الرئيسة تكمن في شرح خطوط الطيف [3] المنبعثة من الجسم الأسود. فقد كان معروفا آنذاك أن الأشعة الكهرومغناطيسية تصدر بشكل مستمر. هذا يعني أن طاقة أو تردد الإشعاع تزداد بزيادة التسخين. لكن ما تم ملاحظته تجريبيا كان مقلقا للغاية, فبزيادة التسخين تزداد طاقة الإشعاع المنبعث حتى تصل إلى قيمة عظمى معينه, ثم تبدأ بعدها بالنزول السريع.

في البداية سنقوم بتوضيح العلاقة بين طيف الإشعاع $spectral\ emittance$ والطول الموجي. يعرف طيف الإشعاع, بحيث يكون $\mathrm{I(\lambda)d\lambda}$ مساويا للطاقة الصادرة من وحدة المساحة في وحدة الزمن, محصورا في مدى الطول الموجي λ و $\lambda + d\lambda$ عند ثبات درجة الحرارة.

يمثل الشكل (2-1) العلاقة بين طيف الإشعاع $I(\lambda)$, والطول الموجي عند درجات حرارة مختلفة. حيث نلاحظ أن طيف الإشعاع يزداد طرديا مع الطول الموجي, حتى يصل إلى قيمة عظمى $\lambda_{\max}$ ثم يبدأ بعدها بالنزول السريع. وعند ارتفاع درجات الحرارة يزداد ارتفاع القمة فقط, ولكن في النهاية تهبط مرة اخرى وهكذا.

هناك علاقة تجريبية اكتشفها فين $wien$, وهي وجود تناسب عكسي بين λ_{max} ودرجة الحرارة T:

$$\lambda\ \ _{ax}T = 2.9 \times 10^{-3} \qquad (1-1)$$

أي أن حاصل ضرب طول الموجة العظمى في درجة الحرارة يعطي دائما ثابت تجريبي. وتسمى تلك العلاقة الأخيرة بقانون فين للإزاحة $wien's\ displacement\ law$.

إن تعريف طيف الإشعاع على انه الطاقة الصادرة من وحدة المساحة في وحدة الزمن في المدى $\lambda + d\lambda$, يعني أن هذه الطاقة صادرة في مدى طول موجي أو تردد معين, وليس عند جميع الأطوال الموجية أو الترددات, لذلك إذا أردنا الحصول على الطاقة الكلية من وحدة المساحة في وحدة الزمن, والتي تسمى بشدة الإشعاع الكلية $\mathrm{total\ intensity}$, يجب أن نقوم بتكامل طيف الإشعاع على جميع الأطوال الموجية:

$$I = \int_0^\infty I(\lambda)d\lambda \qquad (1-2)$$

وتتناسب هذه العلاقة مع المساحة المحصورة تحت المنحى في الشكل (2-1).

في عام 1879, وجد ستيفان Stefan علاقة تجريبية مهمة. لقد وجد أن شدة الإشعاع الكلية تتناسب طرديا مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة:

$$I = \sigma T^4 \qquad (1-3)$$

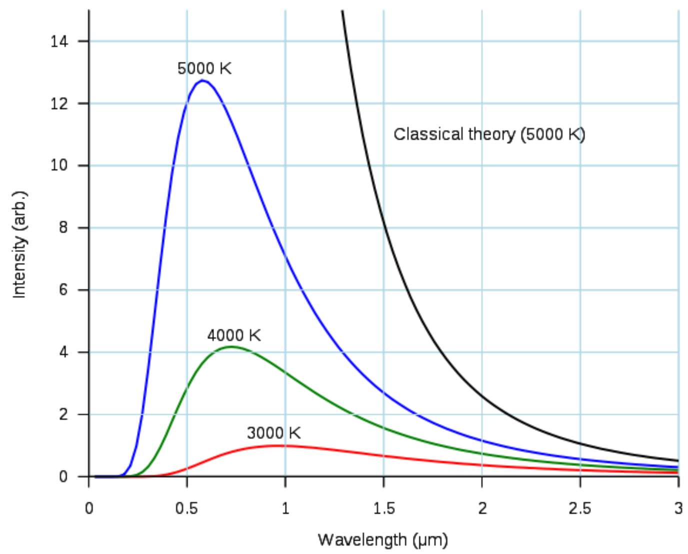
حيث σ ثابت التناسب, ويسمى بثابت ستيفان – بولتزمان, ويساوي :

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \qquad w/m^2k^4$$

تسمى العلاقة (1-3) بقانون ستيفان – بولتزمان لإشعاع الجسم الأسود Stefan – Boltzmann law.

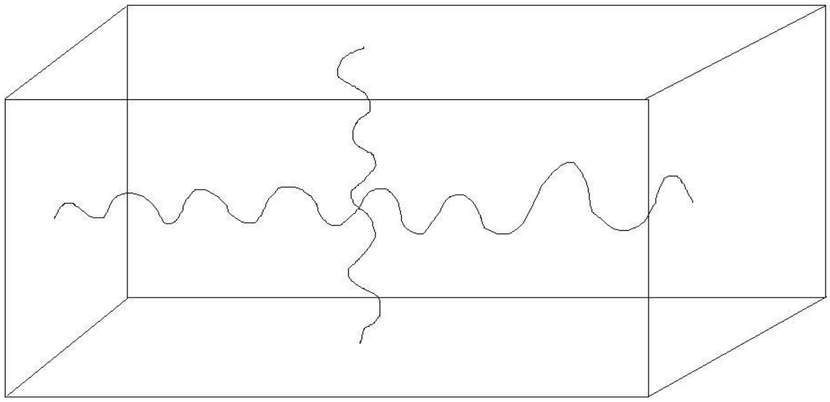
2-1 نظرية رايلي – جينز الكلاسيكية

حاول رايلي و جينز $Rayleigh\ and\ Jeans$, باستخدام قوانين الميكانيكا الكلاسيكية, والنظرية الكهرومغناطيسية تفسير إشعاع الجسم الأسود. كان من المعروف في النظرية الكهرومغناطيسية, أن جميع الأجسام المشحونة المتسارعة تصدر إشعاعا كهرومغناطيسيا مستمرا. افترضا رايلي وجينز أن شكل التجويف, شكل (1-1), عبارة عن مكعب طول ضلعه a. في هذه الحالة يقوم الإشعاع الكهرومغناطيسي بثلاث انعكاسات على المحاور (x, y, z), كما هو موضح بالشكل (1-3). و طالما أن الجدران متوازية فلن يحدث أي تداخل لمركبات الموجات الكهرومغناطيسية. تسمى الموجات الذاهبة والقادمة من أي محور بالموجات الموقوفة standing waves, ويتحدد أطوال أمواجها أو تردداتها بأبعاد التجويف. من المعلوم أن انتشار الموجة الكهرومغناطيسية متعامد مع متجه المجال الكهربائي E, والذي بدوره يكون



شكل (1-2)

توزيع طيف إشعاع الجسم الأسود كدالة في الطوال الموجي.



شكل(3-1)

انعكاس الإشعاع الكهرومغناطيسي على ثلاث محاور.

موازي للحائط. باستخدام خواص الموجات الكهرومغناطيسية, نجد أن الأشعة المنتشرة في المحور x توجد لها عقدتان nodes, حيث ينعدم المجال الكهربائي E عند $x = 0$ و $x = a$. وينطبق ذلك أيضا على المحوران y و z.

إذا سلمنا الآن بأن الأمواج الكهرومغناطيسية الموجودة داخل الصندوق موقوفة, فيجب أن تتخذ أطوال أمواجها قيما معينه تحقق العلاقة التالية:

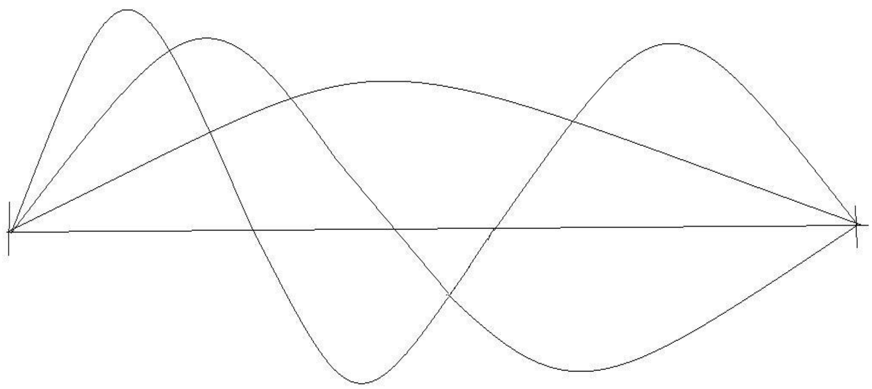
$$a = n\left(\frac{\lambda}{2}\right) \qquad (1-4)$$

حيث $n = 1, 2, 3, ...$. أي نحتاج إلى أعداد صحيحة من أنصاف الأطوال الموجية, حتى يتسنى للموجة أن تدخل داخل الصندوق. والموجات التي لا تحقق المعادلة (4 -1) تتلاشى بتداخلات هدامة Destructive interference. يوضح الشكل (4-1) بعض الموجات الموقوفة باتجاه محور x لثلاث قيم مختلفة.

باستخدام قوانين الفيزياء الكلاسيكية والنظرية الكهرومغناطيسية, اشتق رايلي وجينز المعادلة النهائية لطاقة الجسم الأسود كدالة في التردد ν ودرجة الحرارة T:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}\ \bar{E} \qquad (1-5)$$

حيث $\bar{E}$ متوسط الطاقة وتعطى باستخدام توزيع بولتزمان Boltzmann Distribution كالتالي:



شكل (1-4)

بعض الموجات الموقوفة لبعض قيم n في محور x.

$$\bar{E} = \frac{\int_0^\infty Ee^{-E/kt}dE}{\int_0^\infty e^{-E/kt}dE} = kT \qquad (1-6)$$

حيث k يسمى ثابت بولتزمان ويساوي:

$$k = 1.3 \times 10^{-23} J/k$$

وبتعويض المعادلة (6-1) في المعادلة (5-1) نحصل على :

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}\ kT \qquad (1-7)$$

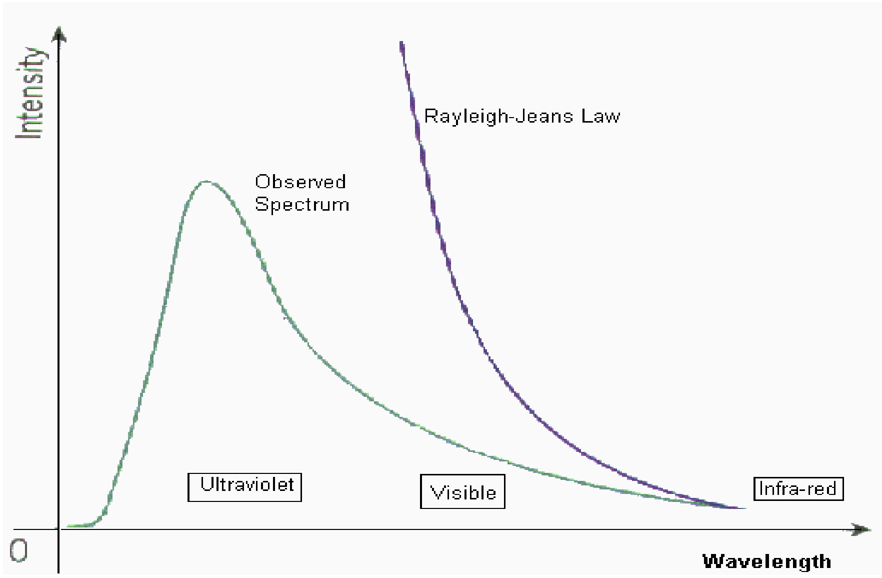
وتسمى هذه العلاقة بقانون رايلي – جينز لإشعاع الجسم الأسود, $u(\nu, T)$ هي كثافة الطاقة $energy\ density$ وهي طاقة جزئية. لذلك وللحصول على كثافة الطاقة الكلية نقوم بتكامل كثافة الطاقة على جميع الترددات:

$$U = \int_0^\infty u(\nu, T)\ d\nu \qquad (1-8)$$

وترتبط هذه العلاقة بشدة الإشعاع الكلية I , المعادلة (3-1), على النحو التالي:

$$I = \frac{c}{4}\ \mathrm{U} \qquad (1-9)$$

لكن هل تستطيع العلاقة (7-1) تفسير النتائج التجريبية لإشعاع الجسم الأسود. لبيان ذلك دعنا نرى الشكل (5-1), والذي يوضح مقارنة بين قانون رايلي – جينز وكثافة الطاقة لإشعاع الجسم



شكل (5-1)

مقارنة بين قانون رايلي - جينز وشدة الإشعاع كما تعطى تجريبيا. يبين الشكل كيف أن قانون رايلي – جينز يذهب إلى اللانهاية مع ارتفاع طاقة الإشعاع مما ينبئ بكارثة فوق البنفسجي.

الأسود كما تعطيها التجارب المخبرية. يتضح مباشرتا بأن هناك اختلاف بين قانون رايلي – جينز وكثافة الطاقة المعطاه تجريبيا. يتنبأ قانون رايلي – جينز باستمرار كثافة الطاقة مع نقصان الطول الموجي, بينما نرى أن المعطى تجريبيا يصل إلى قيمة عظمى معينة ثم يبدأ بعدها بالنزول السريع. يتفق قانون رايلي – جينز بصورة ممتازة مع الطاقات المنخفضة أو الأطوال الموجية الطويلة, لكن بزيادة الطاقة وانزياح الأطوال الموجية نحو الأشعة فوق البنفسجية, يبدأ الاختلاف بين النظرية والتجربة بالظهور.

لو أخذنا تكامل العلاقة (7-1) على جميع الترددات, وذلك للحصول على الطاقة الكلية, سنجد بأن الناتج كمية لا نهائية ! وهذا بالتأكيد لا يطابق التجربة ولا الواقع. لقد أطلق على هذه المشكلة اسم (كارثة فوق البنفسجي) ultraviolet catastrophe. وهذا يدل على وجود عيوب نظرية في قانون رايلي – جينز.

ظلت معضلة الجسم الأسود قائمة بدون تفسير حتى عام 1900, حينما أتت أول حركة راديكالية على الفيزياء الكلاسيكية. كان صاحبها يرى وجوب تقديم تفسير نظري بأي وسيلة ومهما كان الثمن غاليا على الفيزياء الكلاسيكية. هكذا أمن ماكس بلانك Max Planck بوجوب انتهاج أفكار جديدة لحل المعضلة وحسب قوله:

(فعل اليأس.......لابد من تقديم تفسير نظري مهما بلغت التكلفة و بأي ثمن)[4].

3-1 بلانك يتفادى المشكلة أو يطلق أول رصاصة على الميكانيكا الكلاسيكية

شكلت نظرية رايلي – جينز صدمة لمجتمع الفيزيائيين آنذاك, فعلى الرغم من استخدام قوانين الفيزياء الكلاسيكية والنظرية الكهرومغناطيسية لتفسير إشعاع الجسم الأسود, وافتراض أن هذا الإشعاع ناتج عن الحركة الاهتزازية للالكترونات الموجودة في جدار الجسم, إلا أن كل ذلك لم ينجح في تفسير إشعاع الجسم الأسود. فأين الخلل إذن؟ أفي النظرية أم في قوانين الفيزياء الكلاسيكية؟

في عام1900, أتى ماكس بلانك ليجيب على هذا السؤال؟ لقد اكتشف بلانك أن الخطأ يكمن في استخدام رايلي وجينز متوسط الطاقة الكلية من المعادلة (7-1). كانت الملاحظة المهمة أن حساب متوسط الطاقة من هذه المعادلة الأخيرة يعتمد فقط على درجة الحرارة T. رياضيا نقول, طالما أن هذه المعادلة لا تعمل إلا في الطاقات المنخفضة جدا, إذن نستطيع كتابة أن:

$$E \xrightarrow{\nu=0} kT \qquad (1-10)$$

ولقد لاحظنا من قبل أن كثافة الطاقة الكلية لإشعاع الجسم الأسود, تزداد بزيادة التردد, حتى تصل إلى قيمة عظمى ثم تبدأ بعدها بالنزول السريع كما هو موضح بالشكل (5-1). أي أن:

$$E =\xrightarrow{\nu=\infty} 0 \qquad (1-11)$$

استنتج بلانك من ذلك أن متوسط الطاقة الكلية يجب أن يعتمد على التردد, لا على درجة الحرارة. لم يجد بلانك نفسه إلا أمام خيار واحد, وهو افتراض ان الطاقة الكلية للموجات الموقوفة لا تأخذ إلا قيما منفصلة من الطاقة. وهذا مخالف بشكل واضح لما جائت به النظرية الكهرومغناطيسية من أن الطاقة دائما متصلة.

يتفق بلانك مع نظرية رايلي – جينز في أن سبب الموجات الموقوفة هي المهتزات التوافقية للجسيمات المشحونه الموجودة في جدار الجسم الأسود. لكن الاختلاف بينهما كان حول ماهية الاشعاع. نجد في نظرية رايلي- جينز أن الإشعاع متصل, بينما نجد في نظرية بلانك أن الاشعاع منفصل. طالما أن الإشعاع منفصل, إذن يجب أن يكون مسبب هذه الإشعاع هو الأخر منفصل أيضا. أي أن طاقة المهتزات الذرية في جدران الجسم الأسود يجب أن تأخذ قيما منفصلة. وجد بلانك أن قيمة هذه الطاقة تساوي:

$$E = nh\nu \qquad (1-12)$$

بهذه المعادلة الصغيرة, أدخل بلانك الفيزياء إلى عهد جديد. اذ مثلت هذه المعادلة ميلاد العصر الكمومي. لقد افترض بلانك ولأول مرة أن الطاقة تأخذ قيما منفصلة تسمى (كوانتا) Quanta. h الموجود في المعادلة أعلاه يسمى ثابت بلانك Plank's constant, ويعد الآن, على الرغم من قيمته الصغيرة جدا من أشهر الثوابت الفيزيائية, وقيمته تساوي:

$$h = 6.63 \times 10^{-34}\, J.s$$

و n عدد صحيح,أي $n = 1,2,3, \dots \dots \dots$

نقوم الآن بتعويض المعادلة (1-12) في المعادلة (1-6), ونبدل التكاملات integrals إلى عملية الجمع sums. وهذا التبديل الرياضي ضروري حتى يتفق مع فكرة التقطيع التي اقترحها بلانك, فالتكامل رياضيا يعني الاستمرار وعملية الجمع تعني التقطيع. يتم الجمع لجميع المتذبذبات التوافقية, أي من $n = 0$ الى $n = \infty$ حيث نجد:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nh\nu \, e^{-nh\nu/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nh\nu/kT}} \qquad (1-13)$$

نستطيع رياضيا كتابة المعادلة السابقة كالتالي :

$$\bar{E} = \frac{E \, e^{-E/kT}}{1 - e^{-E/kT}} \qquad (1-14)$$

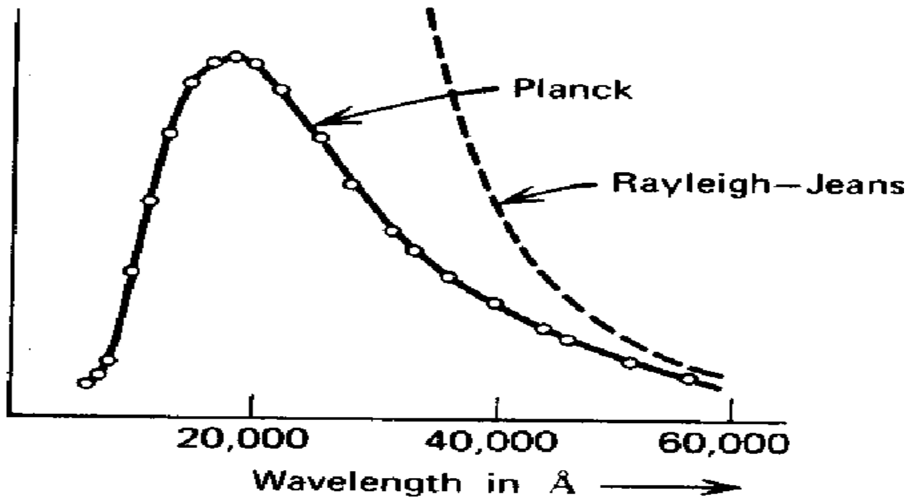
و بأخذ $E = h\nu$ نحصل على:

$$\bar{E} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \qquad (1-15)$$

وبتعويض المعادلة (1-15) في المعادلة(1-5) نحصل على:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \qquad (1-16)$$

وتسمى هذه العلاقة الشهيرة بقانون بلانك لإشعاع الجسم الأسود. وتتفق هذه العلاقة بصورة مذهلة مع النتائج التجريبية, كما هو موضح بالشكل (1-6).



شكل (1-6)

مقارنة بين قانون بلانك و رايلي – جينز. النتائج التجريبية (النقاط) تتفق بشكل مثير مع قانون بلانك.

لم يتنبأ قانون بلانك مع النتائج التجريبية وحسب, بل استطاع أن يبين بأن كل القوانين السابقة عليه, والتي حاولت تفسير إشعاع الجسم الأسود كانت حالة خاصة لقانونه. فلكي نحصل على قانون فين للإزاحة, المعادلة (1-1) نقوم باشتقاق المعادلة (1-16) ومن ثم نساويها بالصفر, وذلك لإيجاد القيمة العظمى, أي λ_{max} . ولإيجاد قانون ستيفان – بولتزمان, المعادلة (1-3), نقوم بتكامل المعادلة (1-16) على جميع الأطوال الموجية, ولكنه تكامل صعب بعض الشيء. أخيرا بالنسبة لقانون رايلي – جينز, فقد بينا فيما سبق أن متوسط الطاقة والذي استخدم من قبل رايلي و جينز يعطى بالعلاقة (1-6), ولكن كما رأينا من قبل أن هذا القانون لا يتفق الا مع الترددات المنخفضة, أما في الحالة العامة فيجب استخدام المعادلة (1-12). نستطيع الآن كتابة العلاقة التالية في حالة الترددات المنخفضة:

$$E = kT \simeq h\nu \simeq \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{kT} \qquad (1-17)$$

عندما تكون قيمة λ كبيرة جدا أي طاقة منخفضة ν, سيؤدي ذلك الى تصغير قيمة e في المعادلة (1-16). و بعدها يمكننا استخدام التقريب الرياضي التالي:

$$e^{x} = 1 + x \qquad (x \ll 1)$$

حيث $x = \frac{h\nu}{kT}$, وبالتعويض في المعادلة (1-16) نحصل على قانون رايلي – جينز. إن قانون رايلي – جينز لا يحتوي على الثابت الكمومي h, لذلك في حالة الطاقات المنخفضة يكون التأثير الكمومي غير مهم, ويمكن استخدام قانون رايلي – جينز. أما عندما تبدأ طاقات الإشعاع بالارتفاع يبدأ التأثير الكمومي بالدخول ويلعب الثابت h دورا هاما, وهذا هو جوهر الاختلاف بين النظريتان.

لاشك أن فكرة التكميم التي أدخلها بلانك إلى المجتمع الفيزيائي كانت دخيلة عليهم. لذلك لم تلاقي قبولا واسعا في البداية, بل إن بلانك نفسه أصبح متحفظا على نظريته. فلا يوجد شيء تجريبي يثبت أن الإشعاع الحراري يتصرف بشكل متقطع. إذ أن كل ما قام به هو بناء صرف لنظرية رياضية تتفق مع التجربة فحسب.

لكن الأوان قد فات, وهو بنظريته تلك قد أطلق أول رصاصة على الميكانيكا الكلاسيكية. لقد بدل فكرة الاستمرار المقبولة لدى جميع الفيزيائيين بفكرة التقطيع الدخيلة على مجتمعهم المتحفظ على عاداته وتقاليده.

بعد خمس أعوام من نظرية بلانك, كان المجتمع الفيزيائي على موعد للقاء فيزيائي دخيل أخر يدعى ألبرت أينشتين Albert Einstein. لم يحاول ذاك الدخيل إبطال أو برهنة نظرية الشخص الذي أصبح صديقه الحميم فيما بعد, بل كل ما فعله هو استعارة المسدس منه وإطلاق الرصاصة الثانية على الميكانيكا الكلاسيكية.

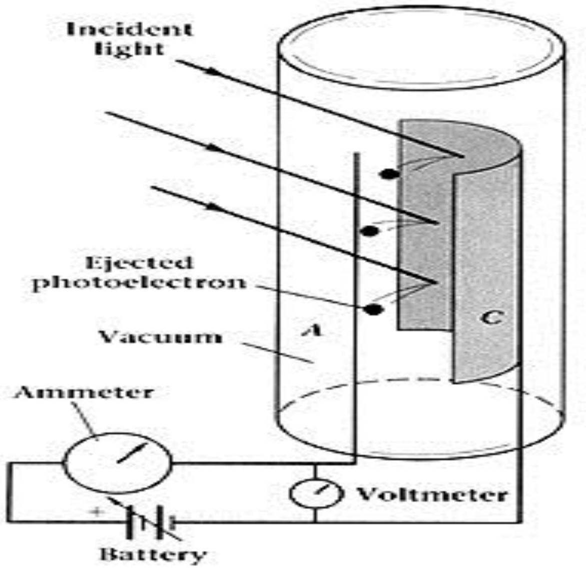
4-1 مشكلة التأثير الكهروضوئي

التأثير الكهروضوئي هو ببساطة إطلاق مجموعة من الالكترونات عند سقوط أشعة كهرومغناطيسية على أسطح بعض المعادن. كان أول من لاحظ هذه الظاهرة هو هرتز Hertz بين عامي 1886 و 1887 بطريقة غيرة مباشرة, وهو يعمل حول تجاربه المشهورة في اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية التي تنبأ بها ماكسويل Maxwell. فقد تبين له أن سقوط الأشعة فوق البنفسجية على أنبوبة التفريغ الكهربائي يسهل عملية التفريغ. بالطبع لم يكن هرتز على علم بأن هناك جسيمات مشحونة تنطلق من السطح تسمى الكترونات. بل تم ذلك بعد اكتشاف جوزيف طومسون j. Thomson للإلكترون عام 1897, حيث تمكن لينارد Lenard عن كشف هوية هذه الجسيمات وهي الالكترونات, وأطلق على هذا التأثير اسم التأثير الكهروضوئي Photoelectric effect .

يبين الشكل (7-1) الجهاز المستخدم في تجربة التأثير الكهروضوئي. يتكون الجهاز بشكل عام من الخلية الكهروضوئية و التي تحتوي على سطح معدني يسمى الكاثود, وهو سالب الجهد الكهربائي, وسطح معدني أخر يسمى الأنود وهو موجب الجهد الكهربائي. يتم وضع المعدنيين داخل وعاء زجاجي مفرغ تماما من الهواء, و مزود بنافذة من الكوارتز, وذلك لان الزجاج يمتص معظم الأشعة قبل وصولها إلى سطح المعدن. يتصل كل من سطحي المعدن بأميتر وفولتميتر لقياس شدة التيار وفرق الجهد على التوالي. يوجد كذلك مصدر للطاقة الكهربائية وذلك لخلق مجال كهربائي يتجه من الأنود إلى الكاثود. أيضا هناك مفتاح عاكس للجهد الكهربائي, اي قادر على قلب اتجاه المجال الكهربائي وذلك لأغراض تجريبية كما سنرى.

تتلخص نتائج تجربة التأثير الكهروضوئي في النقاط التالية:

- يعتمد إطلاق الالكترونات من السطح المعدني على التردد او طول موجة الإشعاع



شكل (7-1)

الجهاز المستخدم لدراسة التأثير الكهروضوئي.

الساقط, وكذلك يعتمد على نوعية المعدن. إن التردد القادر على نزع الالكترونات من المعدن يجب أن يكون أكبر من تردد يسمى (تردد العتبة) $threshold\ frequency$.

- هناك علاقة طردية بين التيار الكهربائي إن وجد و شدة الضوء[5] الساقط, وذلك عند ثبات تردد الضوء وفرق الجهد بين اللوحين الكاثود والأنود.
- عند زيادة الجهد السالب على لوح الكاثود, ترتد بعض الالكترونات ذات الطاقة المنخفضة إلى الوراء, ولا تصل إلى الأنود, مما يؤدي إلى نقصان في شدة التيار الكهربائي. يسمى هذا الجهد ب (جهد الإرجاع) retarding potential. وإذا ما زيد هذا الجهد تدريجيا سيصل إلى قيمة معينه, تنعدم عندها شدة التيار الكهربائي, أي يتوقف سريان الالكترونات. يسمى الجهد في هذه الحالة ب (جهد الإيقاف) $stopping\ potential$, ويرمز له بالرمز $V_{\circ}$. من الممكن ان تتم هذا العملية أيضا بعكس اتجاه المجال الكهربائي بواسطة المفتاح الكهربائي.

هناك علاقة رياضية كلاسيكية بين طاقة الحركة العظمى للإلكترونات , وجهد الإيقاف $V_{\circ}$, تعطى كالتالي:

$$\frac{1}{2}m{v_{max}}^2 = eV_{\circ} \qquad (1-18)$$

كان من المتوقع أن تفسر هذه العلاقة جميع نتائج التجربة, لكن ظلت هناك عدة نقاط فشلت في تفسيرها. أولا: تعتمد طاقة الحركة العظمى للالكترونات على تردد الضوء الساقط لا على شدته. ثانيا: وجود حد أدنى من التردد (تردد العتبة), بحيث لا تنطلق الالكترونات إذا كان تردد الضوء الساقط أقل منه. ثالثا: الفترة الزمنية بين سقوط الأشعة الضوئية على سطح المعدن وصدور الالكترونات فترة أنية, وهذا غير متوقع في ظل قوانين الفيزياء الكلاسيكية. إذ لابد من وجود فارق زمني يعتمد على شدة الإشعاع الساقط. كيف يمكن التغلب على هذه الصعوبات, إن الأمر بحاجة إلى حركة راديكالية أخرى, شبيه بحركة بلانك.

5-1 اينشتين يحل المشكلة أو يطلق الرصاصة الثانية على الميكانيكا الكلاسيكية

في عام 1905 طرح اينشتين ورقة بحث علمي لحل معضلة التأثير الكهروضوئي, التي لم تستطع النظريات الكلاسيكية تفسيرها. كان اينشتين بلا شك على إطلاع على أفكار بلانك الجديدة في تفسير إشعاع الجسم الأسود. لقد بين بلانك أن ذرات الجسم الأسود تمتص الأشعة الساقطة عليها على هيئة كمات, ومن ثم تصدر أشعة كهرومغناطيسية أيضا على شكل كمات. لكن بلانك وكباقي الفيزيائيين اعتقد أن هذه الأشعة في حال صدورها تأخذ شكل موجات كهرومغناطيسية, وهنا يكمن النقص الذي لاحظه اينشتين في عدم القدرة على تفسير الظاهرة الكهروضوئية.

افترض اينشتين أن الضوء يتكون من حبيبات صغيرة جدا من الطاقة, وتكون هذه الطاقة مكممة, أي تصدر في الفراغ وتمتص على هيئة كمات, تماما كما افترض بلانك ما يحدث في ذرات الجسم الأسود. يطلق على حبيبات الضوء التي افترضها اينشتين اسم (الفوتونات)

Photons. كل واحد من هذه الفوتونات يحمل طاقة تتناسب مع تردد الإشعاع ν, تعطى كالتالي:

$$E = h\nu \qquad (1-19)$$

نلاحظ مباشرة أن هذه المعادلة هي نفسها المعادلة (1-12) التي اقترحها بلانك لحالات الطاقة التي تتواجد فيها المهتزات الذرية في جدران الجسم الأسود.

اقترح اينشتين أن الإلكترون الواحد الموجود في المعدن يقوم بامتصاص فوتون واحد, ومن ثم يستخدم الإلكترون طاقة الفوتون للتخلص من ارتباطه بسطح المعدن والخروج على هيئة طاقة حركة. توصل اينشتين إلى المعادلة النهائية التي تحكم ظاهرة التأثير الكهروضوئي, وهي:

$$eV_\circ = h\nu - \phi \qquad (1-20)$$

حيث   تسمى دالة الشغل, وهي تعبر عن مدى ارتباط الإلكترون بسطح المعدن. ترتبط دالة الشغل بتردد العتبة بالعلاقة التالية:

$$\phi = hV_\circ \qquad (1-21)$$

وهذه العلاقة تفسر لماذا كان تردد العتبة هو أقل تردد ممكن لنزع الإلكترون من موقعه في الذرة, دون إعطائه أي طاقة حركة.

بهذه الافتراض البسيط تغلب اينشتين على جميع المشاكل التي واجهت النظرية الكلاسيكية. أولا: طاقة الحركة العظمى للالكترونات تعتمد على تردد الضوء الساقط لا على شدته. إن طاقة الإلكترون تعتمد على طاقة الفوتون, وهذا بدوره يعتمد على تردد الضوء, أما زيادة شدة الضوء فتعني فقط زيادة عدد الالكترونات, لكن إذا كانت هناك شدة بدون تردد عالي, لن ينبعث اي إلكترون. ثانيا: يفسر تردد العتبة على انه اقل تردد ممكن حتى تخرج الالكترونات من مواقعها في السطح المعدني. ثالثا: تفسر الفترة الآنية بين سقوط الضوء وانتزاع الالكترونات بفكرة الفوتونات, فالموقف هنا يشبه ضرب كرة بلياردو بأخرى وتحريكها بشكل آني.

مما هو جدير بالذكر هنا, هو أن اينشتين لم يكن أول من فكر بالضوء على انه سيل من الجسيمات, بل كان نيوتن Newton هو أول من اقترح هذه الفكرة. لكن ماكسويل Maxwell برهن فيما بعد رياضيا على ان الضوء موجة كهرومغناطيسية ولها سرعة ثابته في الفراغ, وهي سرعة الضوء. وتعتبر هذه القصة مثيرة جدا بالنسبة لكتاب الفيزياء. فإذا كنت على إطلاع واسع على كتب الفيزياء الأدبية, فلا بد أنك قد صادفتها كثيرا. لكن يجب ألا يفهم بأن نيوتن قد وضع فكرة الفوتونات كما في نظرية اينشتين, بل كان نوع من الحدس النظري, إذ يختلف الوضع كثيرا في عهد اينشتين, الذي زادت فيه التجارب بين الضوء والمادة بشكل كبير.

لقد كان فشل النظريات السابقة في تفسير التأثير الكهروضوئي ونجاح نظرية اينشتين بمثابة الرصاصة الثانية على قوانين الفيزياء الكلاسيكية, بعد رصاصة بلانك. لقد استخدم الاثنان نفس الدستور وهو:

$$E = h\nu$$

و من الآن فصاعدا سنطلق على هذه العلاقة اسم دستور بلانك – اينشتين.

كان اينشتين يعتقد بأنه لا يخالف قوانين الفيزياء الكلاسكية أبدا, بل يتممها. لكن سنرى فيما بعد وعند الانتقال إلى القسم الفلسفي من هذه النظرية, كيف أن أينشتين والذي يعتبر من المؤسسين الأوائل لنظرية الكم, بات العدو اللدود لها.

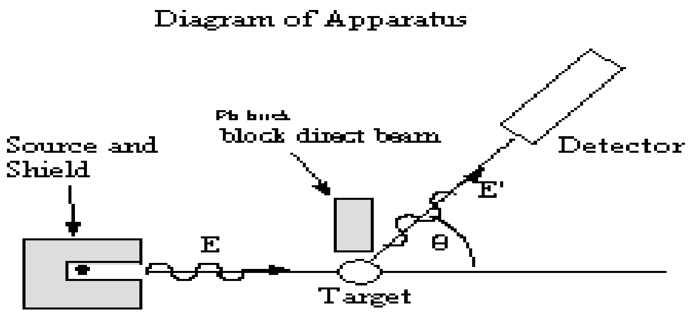
6-1 كومتون المتحري يكتشف رصاص اينشتين

في عام 1913 لعب الفيزيائي الأمريكي آرثر كومتون Arthur Compton دور المتحري في المسرحية الكمومية. فبعدما اكتشف رونتجن الأشعة السينية x – ray في عام 1859 بدأ كثير من الباحثين في استخدامها على المواد. افترضت النظرية الكلاسيكية آنذاك أن مركبات المجال الكهربائي للأشعة الكهرومغناطيسية التي تسقط على المواد تجبر الالكترونات على الاهتزاز بنفس الطريقة ومن ثم إصدار أشعة كهرومغناطيسية من تلك الالكترونات المتسارعة بحيث يكون لها نفس تردد الأشعة الساقطة.

كانت النظرية الكلاسيكية قادرة على تفسير الأشعة المنبعثة في حالت الطاقات المنخفضة (ترددات منخفضة) ولكن في حالة الطاقات العالية تفشل النظرية في ذلك. في عام 1923, استخدم كومتون الأشعة السينية وسلطها على مادة الجرافيت وذلك لبعثرتها. تعرف تلك التجربة اليوم باسم تجربة تأثير كومتون Compton effect.

يبين الشكل (8-1) الجهاز المستخدم لبعثرة الأشعة السينية. يتكون الجهاز بصورة عامة من انبوبة لتوليد الأشعة السينية, و هو قطعة من الجرافيت (الهدف), كذلك يوجد جهاز لرصد الأشعة المبعثرة ويتحرك على مسار دائري.

لم يستخدم كومتون قوانين الميكانيكا الكلاسيكية لتفسير نتائج التجربة, بل وجد ضالته في دستور بلانك – اينشتين. افترض كومتون أن فرض اينشتين حول طبيعة الضوء صحيح. أي



شكل (8-1)

تجربة تأثير كومتون

أن الضوء يتكون من مجموعة من الفوتونات. وقد استخدم الميكانيكا النسبية عوضا عن الميكانيكا النيوتنية, وذلك لأن الفوتونات القادمة من أشعة اكس تحمل طاقة عالية جدا.

يبين الشكل (1-9) رسم تخطيطي لعملية التصادم بين فوتون مع احد الكترونات مادة الجرافيت, والشكل (1-10) عبارة عن رسم اتجاهي لمركبات كمية الدفع للإلكترون والفوتون بعد عملية التصادم. سنعتبر أن الإلكترون ساكن في البداية, وهذا التقريب ممكن نظريا لان طاقة الأشعة السينية عالية جدا بالمقارنه مع طاقة الالكترونات الموجودة في مادة الجرافيت.

من مبدأ حفظ الطاقة, يكون الفرق في طاقة الفوتون مساويا لطاقة الحركة التي يكتسبها الإلكترون [6]:

$$hv - hv' = KE \qquad (1-22)$$

تعطى العلاقة بين الكتلة والطاقة وكمية الدفع في الميكانيكا النسبية كالتالي:

$$E^2 = \mathrm{m}^2\mathrm{c}^2 + \mathrm{p}^2\mathrm{c}^2 \qquad (1-23)$$

وعلى اعتبار أن كتلة الفوتون تساوي الصفر, تكتب المعادلة (1-23) كالتالي:

$$E = pc \qquad (1-24)$$

أو

$$p = \frac{hv}{c} \qquad (1-25)$$

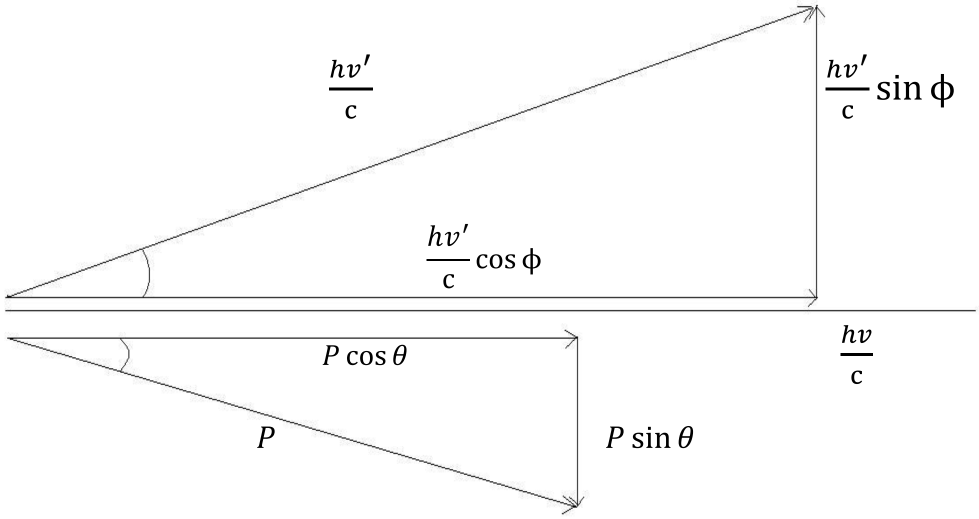
إن كمية دفع الفوتون قبل التصادم هي $\frac{hv}{\mathrm{c}}$, وبعد التصادم $\frac{hv'}{\mathrm{c}}$, والدفع الابتدائي للإلكترون هو 0 (على افتراض انه ساكن) و دفعه بعد التصادم P. لذلك ومن الشكل (1-10) نستطيع كتابة:

$$\frac{hv}{c} + 0 = \frac{hv'}{c}\cos\phi + P\cos\phi \qquad (1-26)$$



شكل (1-9)

تصادم إلكترون مع فوتون في تجربة تأثير كومتون.



شكل (1-10)

رسم تخطيطي اتجاهي لتصادم الفوتون مع الإلكترون. حيث الرسم الأعلى للفوتون والأسفل للإلكترون.

و

$$0 = \frac{hv'}{c}\sin\phi - P\sin\theta \qquad (1-27)$$

نقوم الآن بضرب المعادلتين ب c وإعادة كتابتهما على النحو التالي:

$$Pc\cos\theta = hv - hv'\cos\phi$$

$$Pc\sin\theta = hv'\sin\phi$$

ثم نقوم بتربيع المعادلتين ومن ثم جمعهما:

$$p^2\mathrm{c}^2 = (hv)^2 - 2(hv)(hv')cos\phi + (hv')^2 \qquad (1-28)$$

نعلم أن معادلة الطاقة الكلية تعطى بحسب النظرية النسبية الخاصة كالتالي:

$$E = KE + mc^2 \qquad (1-29)$$

نساوي هذه المعادلة مع المعادلة (1-23) و نحصل على:

$$P^2\mathrm{c}^2 = \mathrm{KE}^2 + 2\mathrm{mc}^2\mathrm{KE} \qquad (1-30)$$

بوضع المعادلة (1-22) في (1-30), ومن ثم وضع الناتج في المعادلة (1-28), نحصل على:

$$2mc^2(hv - hv'^{)} = 2(hv)(hv')(1 - cos\phi) \qquad (1-31)$$

بقسمة هذه المعادلة على $2h^2c^2$ واستخدام العلاقتين $\frac{v}{c} = \frac{1}{\lambda}$ و $\frac{v'}{c} = \frac{1}{\lambda'}$, نحصل أخيرا على:

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{mc}(1 - cos\phi) \qquad (1-32)$$

وهذه هي معادلة كومتون الشهيرة للاستطارة. λ' طول الموجة المستطارة, λ طول الموجة قبل الاستطارة, $\frac{hm}{c}$ مقدار ثابت, يسمى بطول موجة كومتون $Compton\ wavelength$ ويساوي بالنسبة للإلكترون:

$$\lambda_c = \frac{hm}{c} = 2.43 \times 10^{-12}\ m$$

وتتفق المعادلة (1-32) بشكل رائع مع النتائج التجريبية. يبدو أن كل نظرية تعتمد على دستور بلانك - أينشتين تتغلب على جميع الصعوبات النظرية في التجربة.

كذلك تعتبر نظرية كومتون حالة عامة للنظريات السابقة لها. لقد وجدنا حسب التفسير الكلاسيكي للظاهرة أن مركبات المجال الكهربائي للأشعة الكهرومغناطيسية تسقط على المواد وتجبر الالكترونات على الاهتزاز بنفس الطريقة وبالتالي إصدار أشعة كهرومغناطيسية لها نفس التردد. إن تفسير ذلك حسب نظرية كومتون سهل للغاية, وذلك من خلال اعتبار أن الفوتون قد اصطدمت بالكترونات لها طاقة ربط عالية جدا بذراتها, أي أن الفوتون الواحد قد اصطدم بالذرة ككل (ذرة الكربون) وليس بإلكترون مفرد. لو أبدلنا كتلة الإلكترون في المعادلة (1-32) بكتلة ذرة الكربون, سنجد أن الإزاحة في الطول الموجي للفوتون صغيرة جدا, وكأنها لم تتغير, وبالتالي يمكن إهمالها. هذا هو تفسير النظرية الكلاسيكية القديمة.

نلاحظ هنا كيفية إعادة الأمور لنفسها, فلقد وجدنا أن نظرية رايلي – جينز حول إشعاع الجسم الأسود لا تعمل إلا في حالات الطاقة المنخفضة. ثم وجدنا أن نظرية بلانك تعمل في جميع الطاقات, وبالتالي تكون نظرية رايلي – جينز حالة خاصة من نظرية بلانك. الآن وبالمثل تعيد القصة ذاتها, إذ نجد أن النظرية الكلاسيكية القديمة التي حاولت تفسير الاستطارة تعمل فقط في الطاقات المنخفضة (طول موجي عالي), وأصبحت الآن حالة خاصة لنظرية كومتون والتي تعمل في جميع الطاقات أو الأطوال الموجية.

إن نجاح نظرية كومتون في تفسير استطارة الأشعة السينية كان معتمدا بالدرجة الأولى على نظرية أينشتين حول طبيعة الضوء, والتي تفترض أن الضوء يتكون من مجموعة من الجسيمات تسمى فوتونات. أصبحت نظرية كومتون بمثابة الدليل التجريبي القوي على صحة نظرية أينشتين حول الفوتونات وبالتالي صحة نظرية بلانك حول إشعاع الجسم الأسود.

ما زالت قصتنا في بدايتها, وإذا شهدنا في هذا الفصل إطلاق رصاص على الفيزياء الكلاسيكية, فسوف نشهد في الفصول القادمة إطلاق غارات جوية, ليست على قوانين الفيزياء الكلاسيكية فحسب, بل وعلى كل ما كنا نعتقد بأنه بديهي وغير قابل للشك في حياتنا اليومية. سنرى في القسم الثاني من هذا الكتاب كيف أن النظرية التي أتت لتفسير إشعاع حراري انتهت لتفسير العلاقة بين وعي الإنسان والوجود.

هامش الفصل الأول

[1] التردد: عبارة عن عدد الموجات التي تصل إلى منطقة معينة خلال وحدة الزمن.

[2] الطول الموجي: هي المسافة بين قمتين متتاليتين أو قاعين متتالين.

[3] خطوط الطيف: عبارة عن الضوء الصادر من ذرات المادة عند إثارتها.

[4] فريدلان وولف, مع القفزة الكمومية, ترجمة: أحمد السمان, دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر, الطبعة الأولى, 1994.

[5] شدة الضوء: كمية الضوء العمودية على وحدة المساحات.

[6] سوف نتبع في استنتاج المعادلة النهائية كتاب:
$Arthur\ beiser; concepts\ of\ modern\ physics, Tata\ Mcgraw - Hill, 2003,\ P75 - 77$

الفصل الثاني

مشكلة التركيب الذري

مقدمة

إن التساؤل حول الماهية التي يتركب منها العالم, ليس بالتساؤل حديث العهد, بل يعود إلى عصور قديمة جدا. فنجد مثلا ديموقريطس قبل حوالي 25 قرنا من الزمان قد اقترح فكرة أن العالم يتكون من جسيمات صغيرة جدا, أطلق عليها اسم ذرات $atoms$ ومعناها الغير قابل للتجزئة. منذ ذلك الوقت والتساؤلات تطرح حول طبيعة تلك الذرات الغير قابلة للانقسام, ولا نزال منذ ذلك الوقت حتى اليوم لا نملك شيء اسمه الإجابة النهائية!.

بالطبع يختلف الوضع الآن عن الوضع في العصور القديمة. لقد قطعنا شوطا طويلا في فهم الماهية النهائية التي تركب هذا العالم. لم تعد الأمور في العصر الحديث مثلها في العصر القديم, فالآراء في الماضي كانت فلسفية بشكل كامل تقريبا, ولكن اليوم تطرح جميع الآراء والنظريات في البداية, و بعدها تكون التجارب المخبرية هي الفيصل بينهما.

في هذا الفصل سوف نقوم باستعراض ثلاث نماذج ذرية شهيرة في العصر الحديث. أولها نموذج طومسون, وهو نموذج قد وضعه طومسون Thomson بعدما اكتشف الإلكترون في عام 1897. بعدها سنقوم باستعراض نموذج رزرفود Rutherford , تلميذ طومسون, وقد وضعه بعدما قام بتجربته المشهورة في بعثرة جسيمات ألفا. أخر نموذج سنقوم بعرضه هو نموذج ذري شهير يسمى نموذج بور Boher model وقد وضعه بور في عام 1913, و اعتمد فيه على دستور بلانك – اينشتين, ليتفادى العيوب التي وقع فيها نموذج رزرفورد.

1-2 كعكة طومسون المائلة

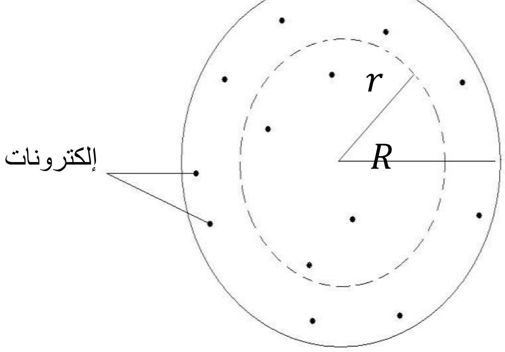
كان تصور طومسون للذرة يشبه إلى حد كبير تصور قطعة من الكعك منثورا عليها قطع من الزبيب. تكون الكعكة ككل هي الشحنة الموجبة وقطع الزبيب هي الشحنات السالبة (الالكترونات). تحتوي الذرة على عدد Z من الالكترونات موزعة بشكل منتظم على الشحنة الموجبة والتي بدورها تحمل شحنة موجبة مستمرة تساوي (Ze) كما هو موضح بالشكل (1-2). حيث نلاحظ أن نصف قطر الذرة ككل هو R , ويوجد نصف قطر اخر r , وهذا السطح وهمي, يسمى بسطح جاوس Gauss's surface. وقد وضعناه حتى نستطيع حساب المجال الكهربائي ومن ثم حساب القوة المؤثرة على الإلكترون والذي يبعد مسافة r من مركز الكرة. تعطى تلك القوة بالعلاقة التالية [1]:

$$F = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_\circ \mathrm{R}^3} r \qquad (2-1)$$

كان حجم الذرة معلوما في ذاك الوقت, فقد كان في حدود الانجستروم $(10^{-10}m)$, وعلى أقرب تقدير في حدود $(0.1 \times 10^{-10}m)$. طالما أن حجم الذرة صغير الى هذا الحد, سيكون تأثير المجال الكهربائي للشحنة الكهربائية المستمرة صغير نسبيا, مما يجعل تأثيره على انحراف قذيفة خارجية مشحونه بشحنه موجبة صغير جدا.

تعود تلك الفكرة الرائعة الى الرائع رزرفورد. لقد وجد بهذه الفكرة الطريقة المناسبة للتأكد من صحة نموذج أستاذه طومسون, واقترح على طالبيه مارسدن وجايجرMarsden and Giger بالبدء في الاختبار العملي للتأكد من صحة نموذج طومسون.

استخدمت جسيمات ألفا (أنوية الهيليوم, بروتونات ونيترونات) كمقذوفات, ولما كانت كتلة أنوية الهيليوم كبيرة جدا بالنسبة للالكترونات, فأنه بالإمكان إهمال قوة الجذب الكهربائي بينهما وبين الالكترونات المنتشرة فوق سطح الذرة على هيئة حبيبات. إذن لا يبقى سوى تأثير الشحنة



شكل (1-2)

نموذج طومسون الذري

الكهربائية الموجبة المنتشرة بشكل مستمر في الذرة. يوضح الشكل (2-2) دخول جسيمة ألفا داخل مجال الذرة وتعرضها للانحراف بزاوية قدرها θ عن مسارها الأصلي. سوف نستخدم هنا الاحداثيات القطبية لتحديد موقع جسيمة ألفا داخل الذرة.

تدخل القذيفة داخل الذرة على ارتفاع b من المركز,تسمى المسافة b بمعامل التصادم impact parameter. لحساب الزاوية θ رياضيا, سنعتبر أن سرعة القذيفة أقل بكثير من سرعة الضوء $(v \ll c)$ وذلك لإهمال تأثير الميكانيكا النسبية. تتلقى المقذوفة عند دخولها مجال الذرة قوة دفع تغير من قيمة قوة الدفع الأساسية في اتجاه y. تعطى تغير كمية الدفع بالعلاقة التالية [2]:

$$\Delta p_{\mathrm{y}} = \int \mathrm{F_y} dt \qquad (2-2)$$

من الشكل (2-2) نجد أن:

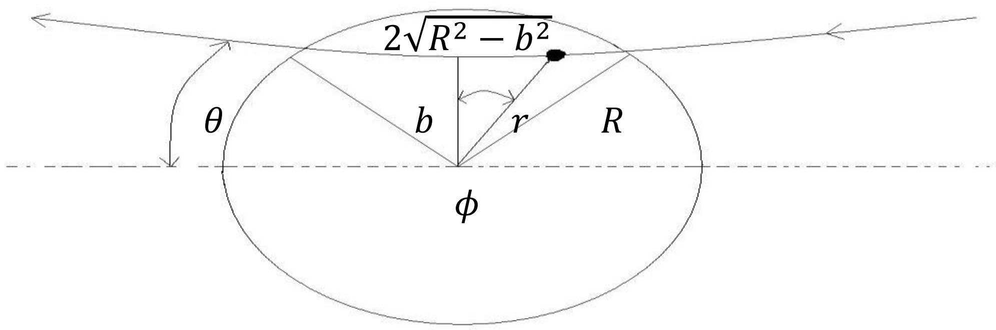
$$F_{\mathrm{y}} = F \cos \phi \qquad (2-3)$$

وكذلك:

$$\cos \phi \cong \frac{b}{r} \qquad (2-4)$$

تمتلك المقذوفة (نواة الهيليوم) شحنة مقدارها ze, وبالتالي تكون القوة الموثرة عليها حسب العلاقة (2-1) هي:

$$F = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_\circ R^3} r \qquad (2-5)$$



شكل (2-2)

انحراف جسيمة ألفا عند دخولها مجال ذرة طومسون, وذلك بسبب الشحنة الكهربائية الموجبة المنتشرة.

بتعويض المعادلات (2-3) و (2-4) و(2-5) في (2-2) نحصل على:

$$\Delta \mathrm{P_y} \cong \frac{\mathrm{zZe^2}b\mathrm{T}}{4\pi\epsilon_\circ R^3} \qquad (2-6)$$

حيث T هو الوقت الكلي الذي تقطعه المقذوفة خلال مرورها داخل الذرة, ويساوي المسافة الكلية على السرعة. بحسب الشكل (2-2) يعطى كالتالي:

$$T \cong 2\sqrt{R^2 - b^2}\,/v \qquad (2-7)$$

وبإهمال التغيير في مركبة x يكون لدينا:

$$\tan\theta = \frac{\mathrm{p_y}}{\mathrm{p_x}} \cong \frac{\Delta \mathrm{p_y}}{p_x} \qquad (2-8)$$

إذا كانت الزاوية θ صغيرة جدا, فأن $\tan\theta \approx \theta$. بتعويض العلاقة (2-7) في العلاقة (2-6) ومن ثم تعويض الناتج في العلاقة (2-8) نحصل على:

$$\theta \cong \frac{2\mathrm{zZe^2b}}{4\pi\epsilon_\circ m v^2 R^3}\sqrt{\mathrm{R}^{3-}b^2} \qquad (2-9)$$

وهذه العلاقة هي التي تحسب انحراف القذيفة عند مرورها داخل الذرة. نلاحظ اعتماد زاوية الانحراف θ على معامل التصادم b, لذلك لو كانت $b = 0$ تكون $\theta = 0$ وهذا يعني أن القذيفة لن تنحرف أبدا لأن مجموع القوى المؤثرة عليها يساوي صفر. عندما تكون $b = R$ نجد مرة أخرى أن الناتج صفر, وبالتالي لا تنحرف القذيفة, وتعليل ذلك هو أن القوة تؤثر على المقذوفة فقط داخل الذرة, أي عندما $(b < R)$.

في الواقع يصعب تجريبيا تحديد الزاوية θ بدقة. لذلك لا بد بأخذ قيمة متوسطة للزاوية θ, وسنرمز لها بالرمز θ_{avg}. حتى نحصل على هذه الزاوية سنضع $b = R/2$ كقيمة متوسطة. في هذه الحالة تصبح المعادلة (2-9) كالتالي:

$$\theta_{\mathrm{avg}} = \sqrt{3/4}\,\frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_\circ m v^2 R} \qquad (2-10)$$

إن كل ما قمنا به في هذه المعالجة الرياضية كان على اعتبار قذف جسيمة ألفا واحدة فقط. لكن من المستحيل أن يتم ذلك تجريبيا, إذ لا نستطيع التحكم في عدد الجسيمات المقذوفة. إضافة إلى ذلك يصعب التحكم بمعامل التصادم b وهذا هو سبب اختيارنا لقيمة متوسطة للزاوية θ.

استخدم رزرفورد ومعاونوه في تجربة بعثرة جسيمات ألفا رقيقة من الذهب سمكها $(10^{-6}m)$. لو اعتبرنا أن نصف قطر الذرة هو $R = 10^{-10}m$, وطاقة حركة جسيمة ألفا

تساوي $k = 5\ Mev$ مع $z = 2$ (نواة الهيليوم) و $Z = 79$ (العدد الذري لذرة الذهب), مع اعتبار $mv^2 = 2k$, سنحصل من المعادلة (2-10) على :

$$\theta_{\text{avg}} \cong 2 \times 10^{-4}\text{rad} = 0.01^{\circ} \qquad (2-11)$$

يوضح الشكل (2-3) تبعثر جسيمات ألفا خلال مرورها بصفيحة الذهب.طالما أن الصفيحة المستخدمة هي صفحية ذهب, سوف تصطدم جسيمات ألفا بحوالي $N = 10^4$ ذرة. ستكون انحرافات جسيمات ألفا مختلفة كما هو موضح بالشكل نفسه, وتكون القيمة المتوسطة لكل زاوية انحراف هي θ_{avg} . تعطى العلاقة بين θ و θ_{avg} كالتالي:

$$\theta \cong \sqrt{N}\theta_{avg} \qquad (2-11)$$

لم تكن نتائج بعثرة جسيمات ألفا بواسطة صفيحة من الذهب مؤيدة لنموذج طومسون بالمرة. كان من المتوقع أن تنحرف جسيمات ألفا بزوايا صغيرة بحدود 0.01°. ولكن لم يحدث ذلك, وجاءت النتائج مخالفة تماما لما هو متوقع, وكانت كالتالي:

1- معظم جسيمات ألفا نفذت دون أن تنحرف, وبعضها انحرفت بزوايا صغيرة, وعلى التقريب نقول بحدود $\theta = 0.01^{\circ}$.

2- عدد قليل من جسيمات ألفا انحرفت بزوايا كبيرة, ولكن أقل من 90°. أي

$90^{\circ} > \theta > \theta_{\text{avg}}$.

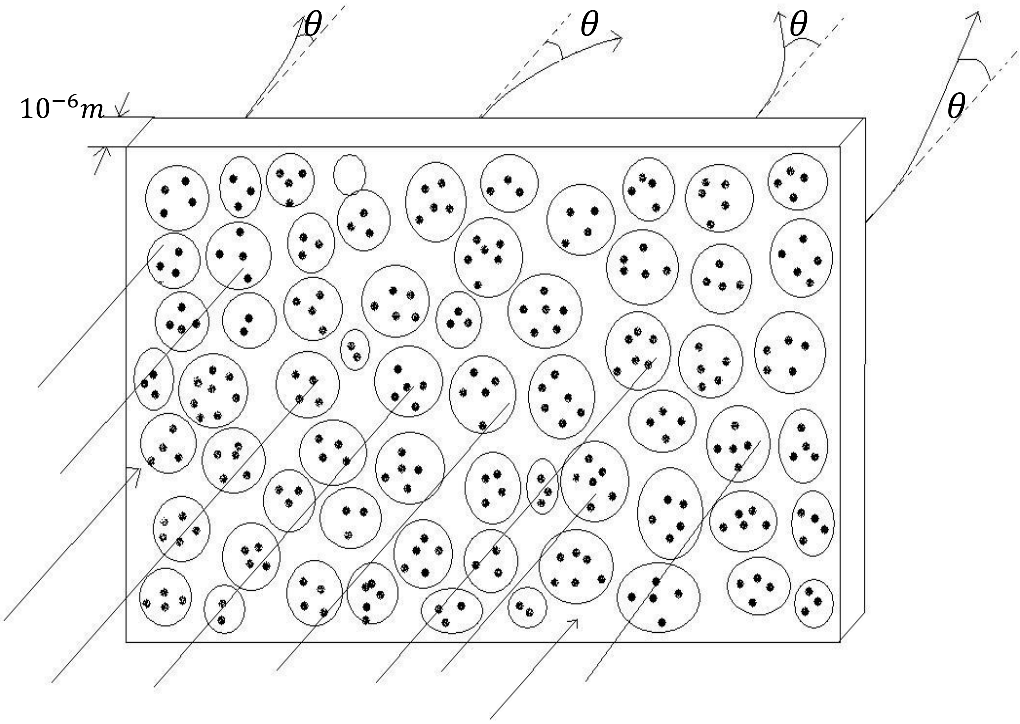
3- عدد قليل جدا من جسيمات ألفا ارتدت إلى الوراء. أي $90^{\circ} < \theta$.

بات واضحا الآن أن نتائج تجربة بعثرة جسيمات ألفا غير متوافقة تماما مع نموذج طومسون. فعلى الرغم من أن معظم جسيمات ألفا قد انحرفت بشكل صغير, إلا أن العدد القليل من الجسيمات المنحرفة بشكل كبير, والعدد القليل جدا من الجسيمات المرتدة إلى الخلف, كافي لنقض نموذج طومسون.

لقد رأى رزرفورد و معانوه ضرورة تعديل كعكة طومسون. لذلك راح يبحث عن نموذج أخر يتفق تماما مع نتائج تجربته, ولكي يجد ذلك النموذج لم يجد سوى حل واحد, وهو اختراع مجموعة شمسية ولكن على المستوى الذري.

2-2 رزرفورد يخترع مجموعة شمسية مصغرة

عندما لاحظ رزرفورد من خلال تجربة بعثرة جسيمات ألفا, بأن هناك مجموعة من الجسيمات نفذت وأخرى انحرفت بزوايا صغيرة, وعدد قليل منها انحرف بزوايا كبيرة جدا, وعدد أخر قليل جدا ارتد إلى الوراء, استنتج من ذلك وجود جزء مركزي تتجمع فيه الشحنة الموجبة ويمثل معظم كتلة الذرة. يطلق على ذلك الجزء اسم (النواة) $nucleus$.



شكل (2-3)

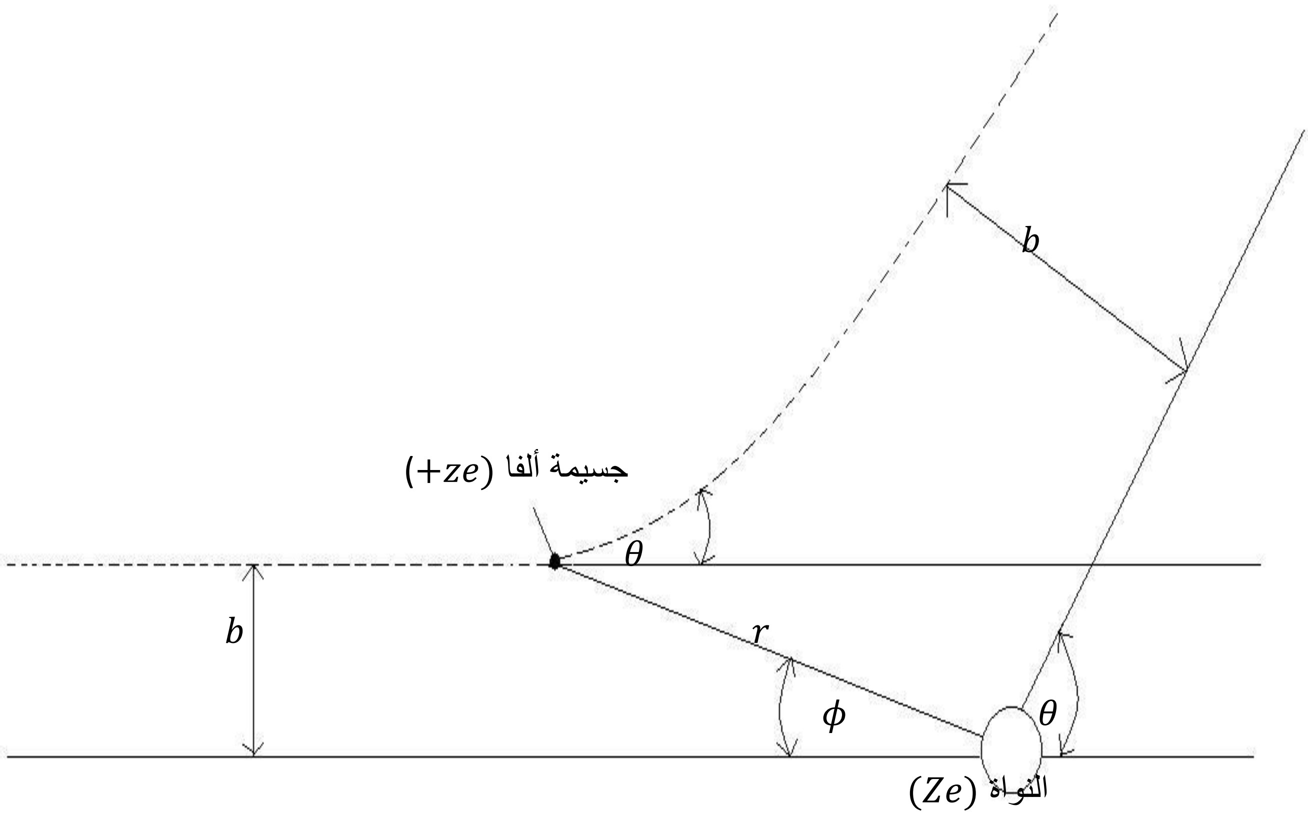
انحراف جسيمات ألفا بزوايا مختلفة عند مرورها بصفيحة من الذهب.

لمعالجة نموذج رزرفورد, سنفترض أن كتلة النواة أكبر بكثير من كتلة جسيمات ألفا, وذلك حتى لا تغير النواة مكانها أثناء التنافر لكهربائي بينها وبين جسيمات ألفا. هذا الافتراض يجعل طاقة الحركة لجسيمة ألفا T_i مساوي لطاقة الحركة النهائية T_{f}:

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}mv_f^2 \qquad (2-12)$$

يوضح الشكل (2-4) انحراف جسيمة ألفا, عند مرورها بالقرب من النواة. يتخذ مسار الجسيم شكل قطع زائد hyperbola. تعطى العلاقة الرياضية بين الزاوية θ ومعامل التصادم b بالعلاقة التالية:

$$b = \frac{zZe^2}{8\pi\epsilon_\circ T}\cot\left({}^{\theta}/_{2}\right) \qquad (2-13)$$



شكل (2-4)

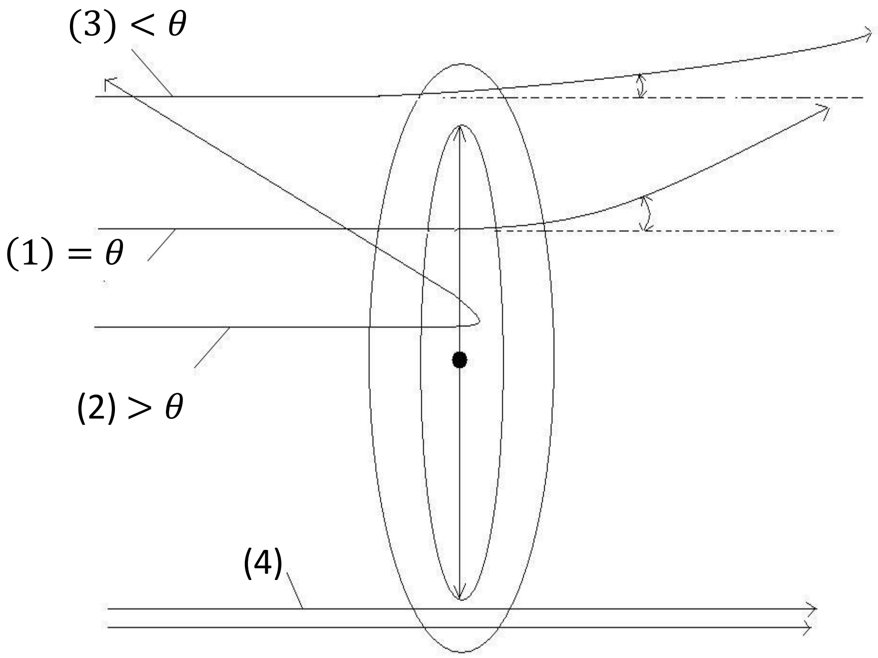
يتخذ جسيم ألفا مسار قطع زائد بعد تفاعله مع النواة.

يبين الشكل (2-5), أن جسيمات ألفا التي يكون معامل تصادمها يساوي b, تنحرف بزاوية قدرها θ (المسار 1). والجسيمات التي يكون معامل تصادمها أقل من b تنحرف بزاوية أكبر من θ (المسار 2). والتي يكون معامل تصادمها أكبر من b تنحرف بزاوية أصغر من θ (المسار 3), وكلما زادت قيمة المعامل b تصغر قيمة الزاوية θ, حتى يمر الجسيمة بخط مستقيم دون أي انحراف (المسار 4). بناءا على ذلك يمكن تعريف معامل التصادم على انه أصغر مسافة يقتربها الجسيم من النواة دون أن يتأثر كهربائيا بها.

بينا في السابق أن معامل التصادم لا يمكن التحكم به تجريبيا, لذلك راح رزرفورد يبحث عن علاقة أخرى يمكن اختبارها تجريبيا.

بالعودة إلى الشكل (2-5) نجد أن جميع الجسيمات التي تسقط ناحية النواة وتنحرف بزاوية θ أو أكبر, تقع جميعها في نطاق دائرة مساحتها:

$$\sigma = \pi b^2 \qquad (2-14)$$



شكل (2-5)

العلاقة بين b و θ.

و تسمى σ بالمقطع العرضي cross section.

لو افترضنا أن سمك الصفيحة المعدنية التي تسقط إليها الجسيمات t, ومساحتها A, وكثافتها ρ, وكتلة المول M, عندها يكون حجم الرقاقة المعدنية يساوي At, وكتلتها $\rho \mathrm{At}$, وعدد المولات $\frac{\rho \mathrm{At}}{\mathrm{M}}$, ويكون في النهاية عدد الذرات في وحدة الحجم من القطعة المعدنية هو:

$$n = \frac{N_A \rho}{M} \qquad (2-15)$$

حيث N_{A} عدد أفوجادرو Avogadro's number (عدد الذرات في المول الواحد) ويساوي $N_A = 6.022 \times 10^{23} mole^{-1}$. يوجد لدينا في الصفيحة المعدنية ذرات كثيرة جدا, ولكل واحدة من هذه الذرات مقطع عرضي σ. يعطى المجموع الكلي للمقاطع المستعرضة كالتالي:

$$A_\circ = \mathrm{nAt\sigma} \qquad (2-16)$$

إن النسبة بين عدد جميع جسيمات ألفا والتي تنحرف بزاوية θ أو اكبر منها, وبين الجسيمات ذاتها, هي النسبة بين المساحة $A_\circ$ ومساحة الصفيحة المعدنية A. باستخدام المعادلة (2-13) و(2-14) و (2-16) نجد أن تلك النسبة هي:

$$f_{\geq\theta} = \frac{A_\circ}{A} = n\pi t(\frac{zZe^2}{8\pi\epsilon_\circ T})^2 cot^2(\frac{\theta}{2}) \qquad (2\text{-}17)$$

عندما يتغير معامل التصادم b في التجربة بين المدى $b + db$ تكون عندئذ زوايا التبعثر للجسيمات في المدى θ و $\theta + \mathrm{d}\theta$, كما هو موضح بالشكل (2-6). يحسب عدد الجسيمات في المدى θ و $\theta + \mathrm{d}\theta$ بتفاضل المعادلة (2-17) بالنسبة ل θ, حيث نجد:

$$df = -n\pi t\left(\frac{zZe^2}{8\pi\epsilon_\circ T}\right)^2 cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right) csc^2\left(\frac{\theta}{2}\right) d\theta \qquad (2-18)$$

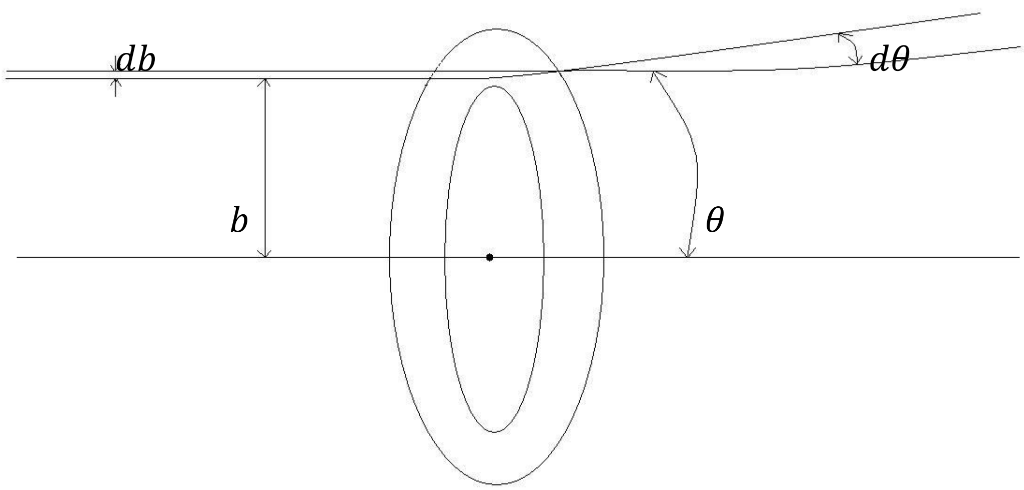
و يمكن إهمال الإشارة السالبة هنا, فهي تبين فقط التناسب العكسي بين θ و b.

يبين الشكل (2-7) تبعثر جسيمات ألفا في المدى θ و $\theta + \mathrm{d}\theta$ من الأعلى والأسفل, مما يشكل في النهاية مخروط زاويته 2θ. في التجربة يوضع كاشف كروي الشكل في المدى θ و $\theta + \mathrm{d}\theta$ وذلك حتى تسقط جسيمات ألفا بشكل عمودي على الكاشف.

تعتمد احتمالية وصول جسيمات ألفا إلى الكاشف الكروي على df, والتي تعطي احتمالية تبعثر جسيمات ألفا خلال الحلق الذي نصف قطره $r\sin\theta$, وعرضه $rd\theta$. تعطى مساحة الحلق بالعلاقة التالية.

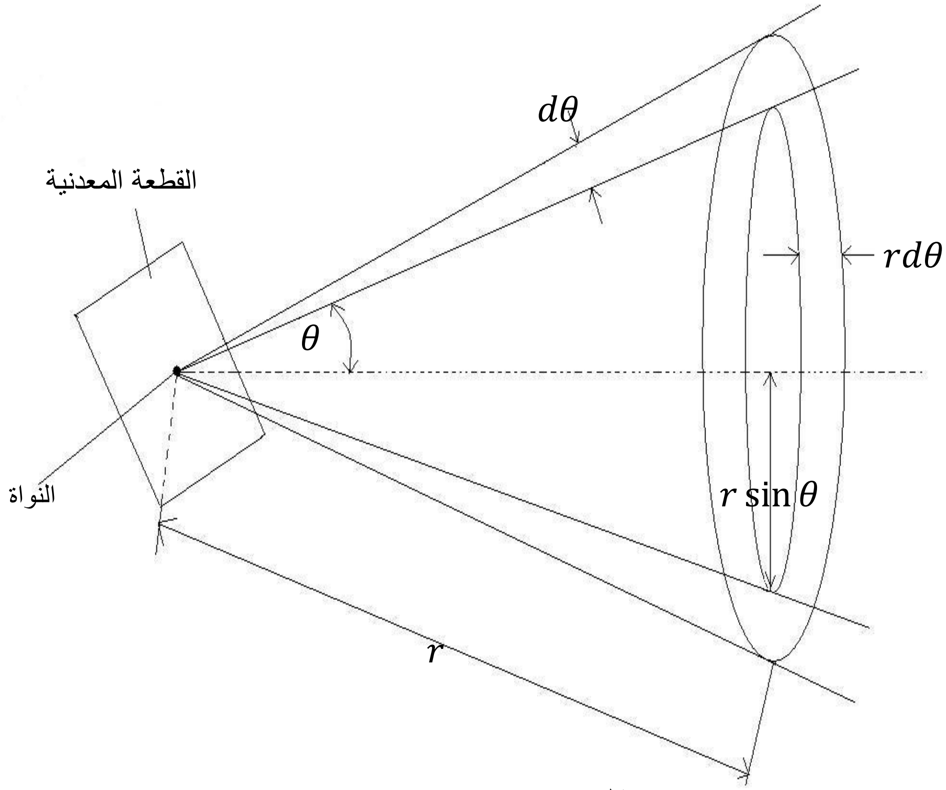
$$dA = (2\pi r\sin\theta) r d\theta \qquad (2-19)$$

ولكي نحسب معدل الجسيمات المبعثرة إلى الكاشف, يجب أن نقوم بحساب نسبة الاحتمالية df الى مساحة الحلق dA. باستخدام المعادلات (2-18) و (2-19) وباستخدام بعض العلاقات المثلثية نحصل أخيرا على:



شكل (2-6)

كيفية ذهاب جسيمات ألفا إلى المدى θ و $d\theta$.



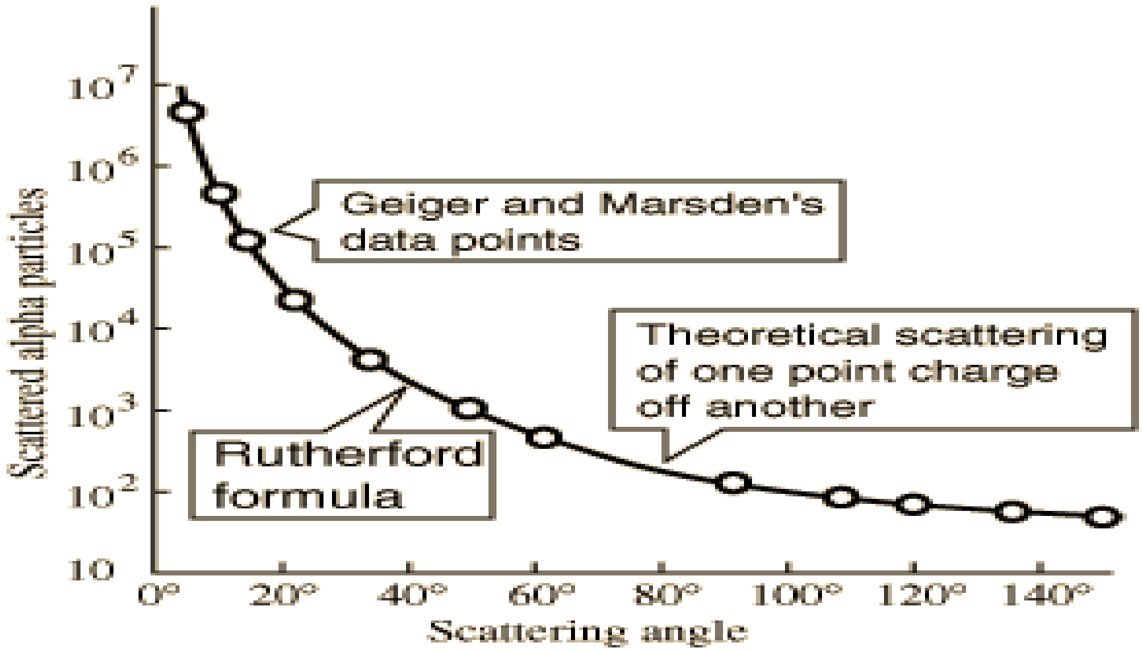
شكل (2-7)

تتجمع جسيمات ألفا على شكل حلق, ويمكن الكشف عن معدل جسيمات ألفا في المدى θ و $d\theta$ في موقع الكاشف الكروي.

$$N(\theta)=\frac{df}{dA}=\frac{nt}{4r^2}(\frac{zZe^2}{8\pi\epsilon_\circ T})^2\frac{1}{sin^4(\frac{\theta}{2})} \qquad (2-20)$$

وتعرف هذه المعادلة الشهيرة بدستور رزرفورد للاستطارة. نلاحظ من هذه المعادلة ما يلي, أولا: عدد الجسيمات التي تسقط على الكاشف, تتناسب طرديا مع سمك القطعة المعدنية t. ثانيا:هناك تناسب طردي بين $N(\theta)$ و مربع العدد الذريZ. ثالثا: هناك تناسب عكسي بين $N(\theta)$ وطاقة الحركة T. وبالفعل تم التأكد من هذه النتيجة عن طريق استخدام رقاقة نحيفة من المايكا $mica$ لإبطاء سرعة جسيمات ألفا. رابعا: هناك تناسب عكسي بين $N(\theta)$ و $(\frac{\theta}{2})^4$, كما نرى في الشكل (2-8), حيث العلاقة العكسية بينهما عند ثبوت جميع العوامل الأخرى.

منذ أن بدأنا بمعالجة نموذج رزرفورد, كان حديثنا منصبا على الجسيمات التي تعبر القطعة المعدنية. لكن ماذا عن الجسيمات القليلة جدا و والتي ترتد إلى الوراء (عندما تكون $b=0$). لقد رأينا من المعادلة (2-12) أن طاقة الحركة الابتدائية تساوي طاقة الحركة النهائية, ولكن في حال الجسيمات التي تقترب رأسا من النواة, تبدأ عندها طاقة الحركة بالانخفاض تدريجيا حتى



شكل (2-8)

العلاقة العكسية بين $sin^4(\frac{\theta}{2})$ و $N(\theta)$, حيث تتناسب بدقة مع معادلة رزرفورد

يقترب الجسيم إلى أقرب نقطة من النواة, في هذه اللحظة تتحول كل طاقة الحركة للجسيمات إلى طاقة وضع U, ولا يتم ذلك إلا في حالة $b = 0$, أما اذا كانت b صغيرة جدا فأن طاقة الحركة للجسيمات لا تنعدم ولكن تصبح صغيرة جدا. لو اعتبرنا أن الجهد الابتدائي يساوي صفر $(U_i = 0)$, وذلك لأن الجسيم بعيد جدا عن النواة, واعتبرنا كذلك أن $b = 0$, تصبح طاقة الحركة النهائية $(T_f = 0)$ وباستخدام قانون حفظ الطاقة تصبح المعادلة (2-12) كالتالي:

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_\circ r_{min}} \qquad (2-21)$$

أو

$$r_{\min} = \frac{\mathrm{zZe}^2}{4\pi\epsilon_\circ \mathrm{T_i}} \qquad (2-22)$$

وتعطي هذه المعادلة أصغر مسافة يقتربها جسيم من النواة ثم يرتد إلى الخلف (r_{min}) .

حتى الآن يبدو نموذج رزرفورد رائع جدا, وقد أجرى جايجر ومارسدن سلسلة من التجارب الكثيرة جدا تتفق بصورة ممتازة مع كل المعادلات الموجودة في هذا النموذج. لكن في هذا النموذج لم نذكر ولا حتى كلمة واحدة بخصوص الالكترونات. لا يمكن أن تكون الالكترونات في هذا النموذج منتشرة وساكنه كما هو الحال في نموذج طومسون, لان الشحنة الموجبة لم تعد الآن منتشرة بشكل مستمر, فهي الآن مرتكزة في مركز الذرة, وهذا يجعل الالكترونات تسقط

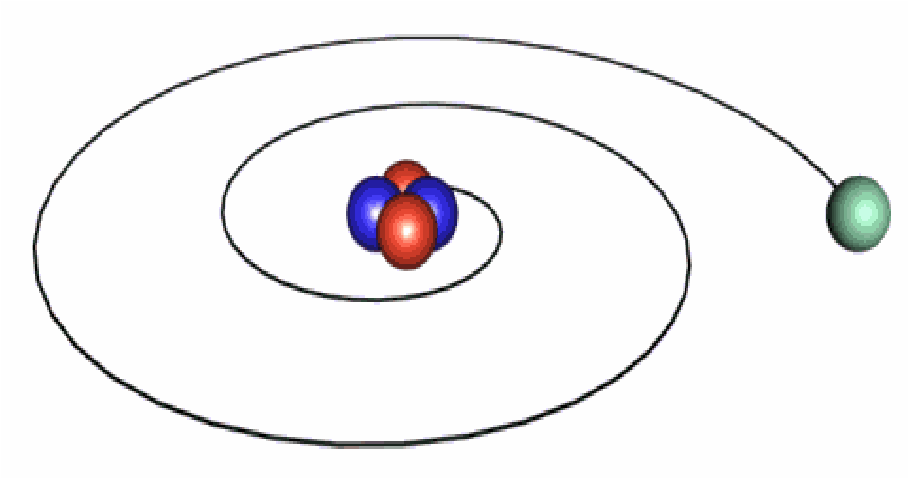
إلى النواة إذا ما اعتبرناها منتشرة وساكنه كما في نموذج طومسون, وبالتالي ينهار شكل الذرة كليا.

لتجنب تلك الصعوبة اقترح رزرفورد أن الالكترونات تدور بشكل دائري حول النواة. تماما كدوران الكواكب حول الشمس. و لما كانت الكواكب لا تسقط في أثناء دورانها حول الشمس, بسبب قوة الطرد المركزي, افترض رزرفورد أن ذلك أيضا صحيح في حال الالكترونات, حيث تتعادل قوة الطرد المركزي مع الجذب الكهربائي للنواة وبالتالي لا ينهار الإلكترون على النواة.

لكن افتراض رزرفورد حول حركة الالكترونات الدائرية يتعارض بشكل مباشر مع واحد من المبادئ الأساسية في النظرية الكهرومغناطيسية. ينص هذه المبدأ على أن كل الأجسام المشحونة المتسارعة تصدر إشعاعا كهرومغناطيسيا, وهذا بدوره يؤدي إلى نقصان طاقة الإلكترون تدريجيا وبالتالي إلى سقوطه بشكل حلزوني متسارع نحو النواة, كما هو موضح بالشكل (2-9). كذلك وحسب النظرية الكهرومغناطيسية, يجب أن يكون تردد الإشعاع الكهرومغناطيسي المنطلق من الالكترونات مساويا لتردد مدار الإلكترون. ولما كانت طريقة دوران الإلكترون الحلزونية متصلة, يجب أن يكون طيف الإشعاع [3] بمختلف تردداته متصل أيضا. ولكن في الحقيقة هذا غير ملاحظ تجريبيا, إذ ما تم ملاحظته من التجارب هو ظهور الطيف على شكل خطوط متقطعة وليست متصلة.

لذلك وعلى الرغم من النجاح الباهر لنموذج رزرفورد في تفسيره لشكل الذرة وتجنب الصعوبات التي واجهت نموذج طومسون, لم يستطيع نموذجه التغلب على تلك العقبتان الأخيرتان. كان لا بد من تسفير لهذه المشاكل حتى يكتمل شكل الذرة الأنيق.

في تلك الظروف كان هناك شاب مغمور يشق طريقه عبر البحار قادما من كوبنهاغن إلى مانشستر, وقد حصل لتوه على شهادة الدكتوراه, وكان موضوع أطروحته عن نموذج طومسون. حيث اكتشف خطأ رياضيا في حسابات طومسون. انضم في خريف عام 1911 إلى



شكل (2-9)

انهيار الإلكترون بشكل حلزوني متسارع داخل النواة, مما يؤدي بالنهاية إلى انهيار شكل الذرة بالكامل.

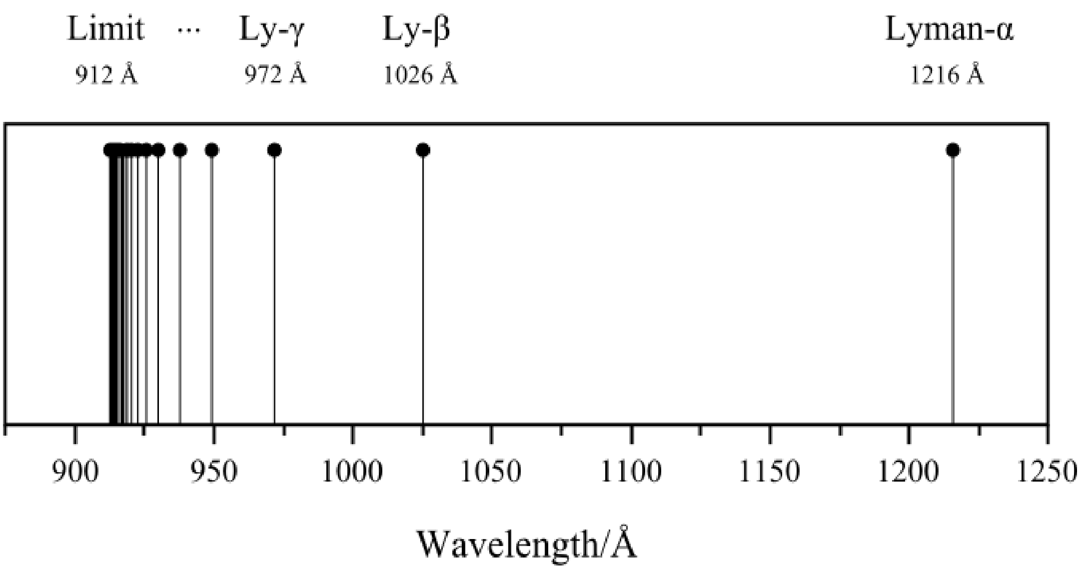
فريق رزرفورد الذي يضم نخبة من الفيزيائيين الشبان, وبدأ أبحاثه هناك واهتم بتفسير خطوط الأطياف الذرية, التي عجز نموذج رزرفورد عن تفسيرها. يدعى ذلك الشاب نيلز بور Niels Boher.

3-2 مشكلة خطوط الأطياف الذرية

تعتبر خطوط الأطياف الذرية بمثابة البصمة المميزة للحالات الذرية. فلقد رأينا في الفصل الأول, أن جميع الأجسام الساخنة تصدر إشعاعا كهرومغناطيسيا بشكل طيفي متصل و بأطوال موجية مختلفة. إن سبب هذا الاتصال في الخطوط الطيفية, هو العدد الكبير جدا للذرات المتفاعلة. لكن الوضع يختلف في الغازات, فعندما يتم تفريغ كهربائي على غاز الهيدروجين تثار ذراته, وعندما تعود تلك الذرات إلى حالة الاستقرار تفقد ما اكتسبته من طاقة عن طريق إطلاق إشعاع كهرومغناطيسي (فوتونات). تكون خطوطه الطيفية على شكل متسلسلة كما هو موضح بالشكل (2-10). يحتوي هذا الشكل على أطوال موجية مقاسه بالانجستروم $\overset{\circ}{A}$. تستخدم هذه الاطوال الموجية في معرفة نوع الذرات المثارة, فهي كما قلنا بمثابة البصمة المميزة للحالات الذرية.

نلاحظ من الشكل نفسه أن خطوط الطاقة تبدأ بمسافات بعيدة نسبيا عن بعضها عند الأطوال الموجية العالية. لكنها ومع تناقص الأطوال الموجية تبدأ بالاقتراب من بعضها البعض, حتى ترتص تماما, ويصبح التمييز بينها أمر صعب جدا.

كان جوهانس بالمر $Balmer$ أول من وضع متسلسلة رياضية تصف بدقة خطوط طيف ذرة الهيدروجين, وذلك في عام 1885. تعطى تلك المتسلسلة كالتالي:



شكل (2-10)

خطوط الطيف لذرة الهيدروجين

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 1,2,3, \ldots \qquad (2-23)$$

حيث λ الطول الموجي, وR مقدار ثابت يسمى بثابت رايدبيرغ $Rydberg\ constant$ ويساوي:

$$R = 1.097 \times 10^7 m^{-1}$$

كانت متسلسلة بالمر تصف جميع الأطوال الموجية الواقعة في المدى المرئي فقط. لكن نجاح هذه المتسلسلة شجع باحثين آخرين على إيجاد متسلسلات في مدى الأطوال الموجية الأخرى, مثل الأشعة تحت الحمراء IR وفوق البنفسجية UV. وقد تم ذلك بالفعل, وتعطى المتسلسلات الأخرى كالتالي:

$$\frac{1}{\lambda} = \mathrm{R}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\mathrm{n}^2}\right) \quad n = 2,3,4, \ldots \qquad Lyman$$ متسلسة ليمان

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 4,5,6, \ldots \qquad Paschen$$ متسلسلة باشن

$$\frac{1}{\lambda} = \mathrm{R}\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 5,6,7, \ldots \qquad Brackett$$ متسلسلة براكت

$$\frac{1}{\lambda} = \mathrm{R}\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 6,7,8, \ldots \qquad Pfund$$ متسلسلة فوند

تستخدم متسلسلة ليمان للأشعة فوق البنفسجية, والمتسلسلات الأخرى للأشعة تحت الحمراء.

على الرغم من هذه المتسلسلات تعطي وصف لخطوط الطيف الذري, إلا أنها لا تعطي معنى فيزيائي محدد لها. كيف تطلق الالكترونات هذه الخطوط؟ لقد رأينا أن نموذج رزرفورد ممتاز في وصف شكل الذرة, ولكنه غير قادر على وصف خطوط الطيف تلك. فما هو سر تلك الخطوط إذن؟

4-2 بور يحل المشكلة باستخدام دستور بلانك – أينشتين

في عام 1913 وضع الفيزيائي الدانماركي نيلز بور نموذج متكامل للذرة. لم يكن نموذجه وصف للنواة الذرية, إذ لم يدع رزرفورد أحدا بعده ليتكلم عن النواة الذرية كثيرا في عصره. كان بور قد وضع نموذجه ليفسر خطوط الطيف الذري, ويتجنب الصعوبات التي واجهت نموذج رزرفورد عن الالكترونات. لذلك من الممكن القول بأن نموذج بور للذرة هو نموذج للإلكترون.

وجد بور الحل في تجنب مشكلة السقوط الحلزوني للإلكترون داخل النواة, باستخدام حلال المشاكل, دستور بلانك – أينشتين. افترض بور للتخلص من الصعوبات النظرية ما يلي:

1. يدور الإلكترون بشكل دائري حول النواة تحت تأثير قوة كولوم, بدون إطلاق أي أشعة كهرومغناطيسية.
2. يتواجد الإلكترون في مدارات محددة حول النواة, ولا يمكن أن يتواجد بينهما. ولما كانت خطوط الطيف تصدر بشكل خطوط متقطعة من التردد الزاوي, يجب أن تكون كمية التحرك الزاوي مكممة أيضا. أي تأخذ قيما محددة فقط. تعطى كمية التحرك الزاوية المكممة تلك كالتالي:

$$L = mvr = n\hbar \qquad (2-24)$$

حيث $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, و n عدد صحيح ويأخذ قيما عادية .... $n = 1,2,3,$ ويسمى بعدد الكم الرئيسي principle quantum number.
3. يصدر الإلكترون عند انتقالة من مدار إلى أخر إشعاعا كهرومغناطيسيا, أو فوتون لكل إلكترون. يعطى تردد كل فوتون بالعلاقة التالية:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_i - E_f}{h} \qquad (2-25)$$

أو

$$\Delta \mathrm{E} = \mathrm{h}\nu \qquad (2-26)$$

وهنا نرى دستورنا القديم, دستور بلانك – أينشتين.

إن الفرضية الأولى في نموذج بور تنتهك بشكل واضح وصريح تنبؤات النظرية الكهرومغناطيسية, ولكنها تتفق مع قوانين الميكانيكا الكلاسيكية, مثل قوة كولوم وقوانين نيوتن. لذلك استخدم بور قانون كولوم لحساب قوة الجذب الكهربائي بين النواة والإلكترون. تعطى تلك القوة كالتالي:

$$F = K\frac{(ze)e}{r^2} \qquad (2-27)$$

حيث e شحنة الالكترون, و ze شحنة النواة. طالما أننا نعالج ذرة الهيدروجين هنا وهي أخف الذرات, ستكون $z = 1$. وهذا لان ذرة الهيدروجين تحتوي على بروتون واحد فقط. في حالة استقرار الذرة تكون قوة الطرد المركزي مساوية لقوة الجذب الكهربائي. باستخدام قانون نيوتن الثاني نجد أن:

$$K\frac{ze^2}{r^2} = m\frac{v^2}{r} \qquad (2-28)$$

من المعادلتين (2-24) و (2-28) نجد أن:

$$v_n = \frac{Kze^2}{n\hbar} \qquad (2-29)$$

وهي سرعة الإلكترون المكممة, ومكممة لأنها تحتوي على العدد الصحيح n. كذلك بالإمكان أن نجد:

$$r_n = \frac{n^2\hbar^2}{mKze^2} \qquad (2-30)$$

وهو نصف قطر الذرة (بعد الإلكترون عن النواة) في إحدى المدارات.

عندما يكون الإلكترون في مستوى الطاقة الأول, تكون $(n = 1)$ وتتخذ المعادلة (2-30) أصغر قيمة لها, وهو أصغر نصف قطر للذرة, ويسمى نصف قطر بور Boher radius $a_\circ$.
وعند التعويض في المعادلة (2-30) نجد أن:

$$a_\circ = \frac{\hbar^2}{mkze^2} = 5.29 \times 10^{-11} m = 0.529 \mathrm{A}^\circ \qquad (2-31)$$

وبالتالي يمكن كتابة المعادلة (2-30) بدلالة نصف قطر بور كالتالي:

$$r_{\mathrm{n}} = \frac{n^2}{\mathrm{z}} a_\circ \qquad (2-32)$$

بالمثل نستطيع إيجاد سرعة الإلكترون في المدار الأرضي, وذلك بوضع $\mathrm{n} = 1$ في المعادلة $(2-29)$:

$$v_1 = 2.19 \times 10^6 \ \mathrm{m/s}$$

وهذه أكبر قيمة لسرعة الإلكترون في ذرة الهيدروجين. نلاحظ أن هذه السرعة صغيرة جدا بالنسبة لسرعة الضوء, وهذا يعلل إهمال تأثير الميكانيكا النسبية هنا.

نستطيع الآن إيجاد طاقة الإلكترون الكلية E_n في احدى مداراته حول النواة, وذلك من خلال العلاقتين (2-29) و (2-30), مع استخدام الإشارة السالبة للجهد الكهربائي, لأننا سنعتبر جهد الإلكترون يساوي الصفر عندما يكون على بعد لا نهائي من النواة:

$$E_n = k_n + \mathrm{V}_n = -\frac{k^2z^2me^4}{2n^2\hbar^2} \qquad (2-33)$$

عندما يكون الإلكترون في الحالة الأرضية $n = 1$ تصبح المعادلة (2-33):

$$E_n = -13.6 \ \mathrm{ev}$$

وهي طاقة الإلكترون الكلية في المدار الأرضي. من الممكن كتابة المعادلة (2-33) على النحو التالي:

$$E_n = \frac{-13.6}{n^2} z^2 \qquad (2-34)$$

لنفرض الآن أن الإلكترون قد انتقل من مستوى الطاقة $n = \infty$ الى $n = 1$, باستخدام المعادلتين (33-2) و (26-2) مع $\nu = \frac{c}{\lambda}$ وأخذ $\frac{1}{\lambda}$ من المعادلة (23-2), نجد أن المعادلتان لا تتساوى إلا في حالة:

$$R = \frac{kz^2me^4}{2n^2\hbar^3c} \qquad (2-35)$$

وتساوي هذه الكمية بالضبط ثابت رايدبيرغ !! لكن هذه المرة بدلالة مقادير فيزيائية معروفة تماما.

بهذه الطريقة أعطى بور المعنى الفيزيائي لثابت رايدبيرغ, الذي كان معروفا من قبل كثابت تجريبي فقط. كذلك أصبحت جميع المتسلسلات التي تصف الأطوال الموجية لطيف ذرة الهيدروجين حالة خاصة لنموذج بور, حيث نجد من متسلسلة بالمر, المعادلة (23-2), تحتوي على العدد 2^2, وهذا يعني الآن بحسب نموذج بور انتقال إلكترون من مستوى الطاقة n إلى مستوى الطاقة الثاني, ومن ثم إطلاق فوتون ضوئي. لذلك كان الرقم الصحيح في متسلسلة بالمر لا يأخذ إلا قيما من ثلاثة فصاعدا. تفسر جميع المتسلسلات الأخرى بنفس الطريقة بالضبط.

يوضح الشكل (11-2) مستويات الطاقة المختلفة لذرة الهيدروجين حسب نموذج بور. إذا أردنا حساب مستوى أي طاقة, نقوم باستخدام المعادلة (34-2). فمثلا لمعرفة حساب مستوى الطاقة الثاني, نضع $n = 2$ في المعادلة (34-2):

$$E_{\mathrm{n}} = \frac{-13.6}{2^2} = -3.4 \text{ ev}$$

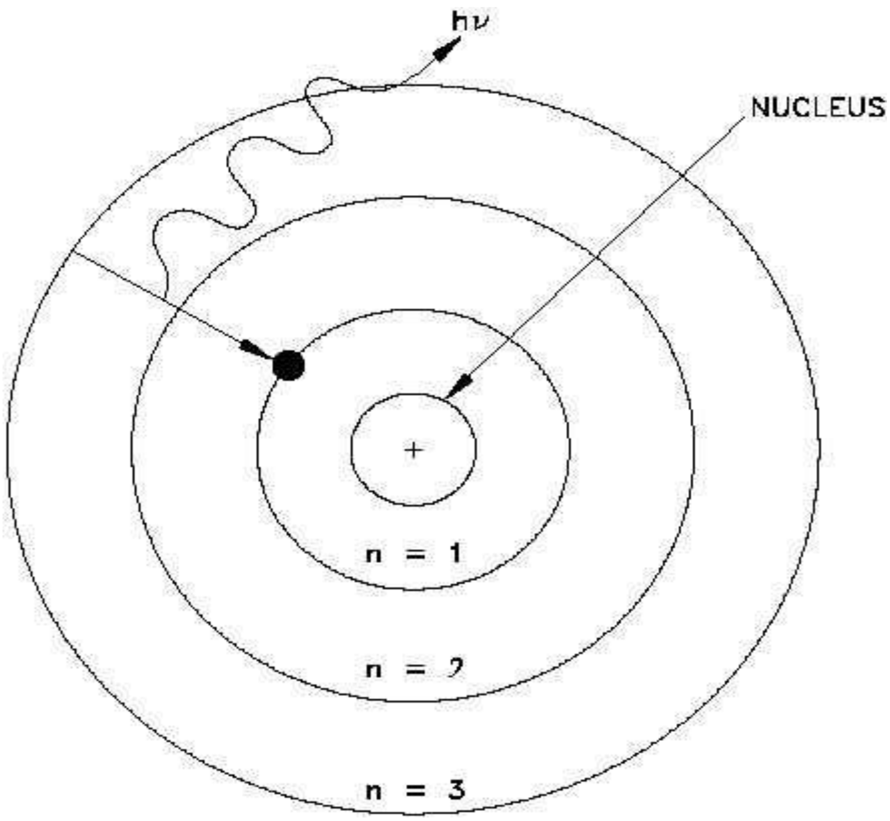
حيث $z = 1$, وهكذا لبقية المستويات.

اعتبرنا في هذه المعالجة أن كتلة النواة (البروتون) كبيرة جدا بالنسبة لكتلة الإلكترون. ففي حالة ذرة الهيدروجين تكون كتلة النواة (البروتون) أكبر من كتلة الإلكترون ب 1836 مرة. لذلك إذا أردنا تحسين الحسابات بشكل أكثر دقة, نقوم بتعويض ما يسمى بالكتلة المختزلة reduced mass, بدلا من كتلة الالكترون في جميع المعادلات الموجودة في نموذج بور. تعطى الكتلة المختزلة كالتالي:

$$\mathcal{M} = \frac{mM}{m + \mathrm{M}} \qquad (2-36)$$

حيث $\mathcal{M}$ كتلة البروتون و m كتلة الإلكترون.

إن نموذج بور حول الذرة مقنع للغاية في تفسير خطوط الطيف الذري على الذرات أحادية الإلكترون. ويمكن تطبيقه على بعض الذرات المتأينة, والتي تسمى بالذرات الهيدروجينية. مثل الهيليوم المتأين (He^{+}) والليثيوم المضاعف التأين (Li^{2++}). في هذه العناصر نقوم بتعويض



شكل (2-11)

مستويات الطاقة المختلفة لذرة الهيدروجين. صدور فوتون ضوئي طاقته $h\nu$ عند انتقال الالكترون من مستوى الطاقة الثالث $n = 3$ الى مستوى الطاقة الأول $n = 1$.

العدد الذري z الخاص بها في كل المعادلات السابقة. بصورة عامة يتوافق نموذج بور مع ذرات العناصر الخفيفة المتأينة التي يكون عددها الذري $z \ll 20$. أما في حالات العناصر الثقيلة $z > 20$ فلا تتفق النتائج مع نموذج بور. كذلك في حالة زيادة العدد الذري فأن ذلك يؤدي الى زيادة سرعة الالكترون (انظر المعادلة (2-29)), وهنا يكون تأثير الميكانيكا النسبية مهما.

إذن على الرغم من جمال نموذج بور, إلا أنه لا ينطبق إلا على الذرات وحيدة الإلكترون. ولكن في حالة الذرات المتعددة الإلكترون يفشل النموذج تماما في تفسير خطوط الأطياف الذرية.

مما هو جدير بالذكر ما قام به كل من سومرفيلد و ويلسون $\text{Sommerfeld} \,\&\, Wilson$ من تطوير لنموذج بور. حيث افترضا أن مدارات الالكترونات بيضاوية الشكل وليست دائرية, وتقع النواة في إحدى البؤرتين. يذكرنا ذلك بنموذج كبلر Kepler حول حركة الكواكب في المجموعة الشمسية. جعلت تلك الفرضية مدارات بور حالة خاصة لها, إضافة إلى ذلك تم تطبيق الميكانيكا النسبية بدلا من الميكانيكا الكلاسيكية, وتم تفسير التشققات التي تحدث لخط الطيف الواحد. لكن مع كل ذلك تفشل تلك المعالجات الجديدة بالنهاية في معالجة الذرات المتعددة الالكترونات, كما فشل نموذج بور.

5-2 مبدأ المقابلة

لقد رأينا في الفصل الأول فشل الميكانيكا الكلاسيكية في تفسير إشعاع الجسم الأسود, ثم أتى بلانك وحل المشكلة باستخدام فكرة تكميم الطاقة. بعد ذلك بينا كيف أصبحت نظرية رايلي – جينز حالة خاصة لنظرية بلانك. ثم برهنا أن نظرية كومتون للاستطارة , حالة عامة, وان جميع النظريات الكلاسيكية السابقة حالة خاصة لها. هناك أمثلة كثيرة في الفيزياء الحديثة على ذلك, مثلا نجد أن الميكانيكا الكلاسيكية هي حالة خاصة للميكانيكا النسبية, ونظرية نيوتن في الجاذبية حالة خاصة لنظرية أينشتين في النسبية العامة. إن هذا هو جوهر مبدأ المقابلة الذي عبر عنه بور كالتالي:

(هناك تطابق عام بين تنبؤات الفيزياء الكمية والفيزياء الكلاسيكية في الحالات التي توصف بأعداد كمية كبيرة).

لتوضيح ذلك رياضيا, سنبرهن على أن التردد الكلاسيكي للحركة الدائرية للإلكترون, يساوي التردد الكمي عندما توصف الحالات بأعداد كمية كبيرة.

يعطى تردد الإلكترون الزاوي أو تردد الإشعاع الزاوي في الحالات الكلاسيكية كالتالي:

$$\nu_{\mathrm{cl}} = \frac{me^4}{32\pi^3\epsilon_\circ^2\hbar^3}\frac{1}{n^3} \qquad (2-37)$$

هذه العلاقة صحيحة في حالة الأعداد الكمية الكبيرة, لكن عندما يقفز الإلكترون من مستوى الطاقة n الى $n-1$, يكون التردد الكمي هو:

$$\nu_{\mathrm{q}} = \frac{me^4}{64\pi^3\epsilon_\circ^2\hbar^3}\frac{2n-1}{n^2(n-1)^2} \qquad (2-38)$$

الآن عندما تكون n كبيرة جدا, نستطيع تقريب $n-1$ الى n و $2n-1$ الى $2n$, و بالتالي تصبح المعادلة (2-38) كالتالي:

$$\nu \cong \frac{me^4}{32\pi^3\epsilon_\circ^2\hbar^3}\frac{1}{n^3} \qquad (2-39)$$

وهذه هي بالضبط المعادلة (2-37), والتي تعطي التردد الكلاسيكية للإلكترون. هذا هو مغزى مبدأ المقابلة الذي وضعه بور.

هامش الفصل الثاني

[1] من الممكن مشاهدة البرهان في كتب أساسيات الفيزياء, قسم الفيزياء الكهربائية.

[2] سوف نتبع في استنتاج المعادلة النهائية كتاب:
$Kenneth\ Krane, Modern\ Physics, John\ Wiely, 1996, P175 - 177$

[3] سوف نتكلم بالتفصيل عن خطوط الأطياف الذرية في الجزء القادم من هذا الفصل.

الفصل الثالث

<u>كذلك المادة ترغب بطبيعتان</u>

مقدمة

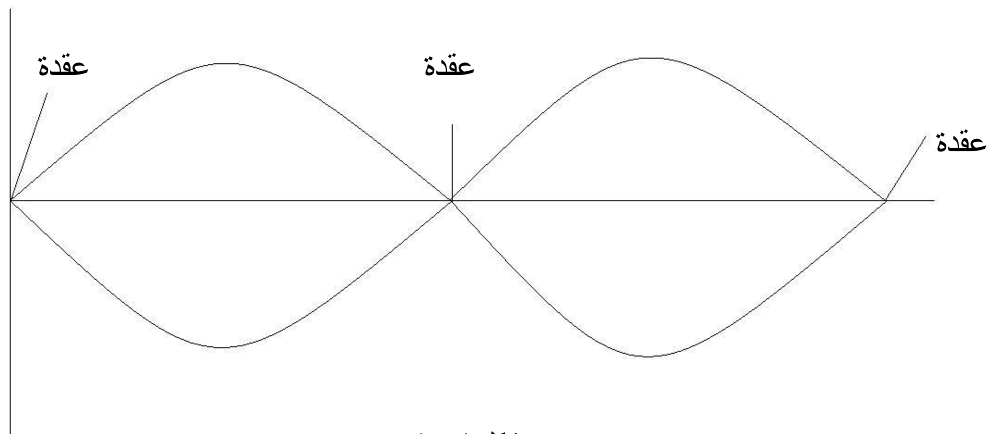
رغم النجاحات الكثيرة المتواصلة من بلانك حتى بور, ظلت هناك تحفظات كثيرة على نظرية الكم. فمدارات بور كانت مزعجة جدا للنظرية الكهرومغناطيسية, حيث تحتفظ الالكترونات بمدارتها دون أن تشع أي موجات كهرومغناطيسية, وهذا انتهاك واضح لتنبؤات النظرية الكهرومغناطيسية. إضافة إلى ذلك كانت سلسلة النجاحات المتواصلة في تفسير ما عجزت الفيزياء الكلاسيكية عنه معتمدا على الدستور اللغز $E = h\nu$ بدون تعليل. فما المعنى الفيزيائي لذلك الدستور؟

بالطبع لا يمكن للميكانيكا الكلاسيكية أن تفسر كل تلك الفرضيات الجديدة. لكن قد نجد تفسير لها, لو استخدمنا الميكانيكا النسبية. أحد أهم النتائج في النظرية النسبية الخاصة, مبدأ تكافؤ الكتلة و الطاقة, والذي يعطى بالعلاقة الشهيرة:

$$E = mc^2$$

حيث من الممكن تحويل المادة إلى طاقة على صورة إشعاع, والطاقة (إشعاع) إلى مادة. لقد علمنا من الفصل الأول من نظرية الفوتونات أن الضوء ذو طبيعة مزدوجة. أي انه يتصرف في بعض الأحيان على انه موجة وفي أحيان أخرى على انه مجموعة من الجسيمات (فوتونات).

الآن, طالما أن المادة والطاقة متكافئتان, أي أنهما وجهان لعملة واحدة, والطاقة ذات طبيعتان, إذن هل من الممكن أن تكون المادة هي الأخرى ذات طبيعتان؟ إضافة إلى ذلك, فقد وجدنا في نموذج بور أن الإلكترون لا يتخذ إلا مدارات خاصة به, وان كمية التحرك الزاوي لهذا الإلكترون تتخذ قيما صحيحة معينه من الثابت $\hbar$, المعادلة (2-24). قد نجد هنا علاقة مع ما يسمى بالأمواج المستقرة Standing Waves, حيث تحتوي هذه الأمواج على ما يسمى بالعقد $nodes$, كما هو موضح بالشكل (3-1).



شكل (3-1)

عندما نقوم بهز الحبل تتشكل موجة تصطدم بالحائط وتعود مشكلة عقدة في الوسط, إضافة إلى عقدة في الطرفين. إن ما أريد الوصول إليه هنا, هو أن طول الحبل يجب أن يتخذ قيما صحيحة من أنصاف الأطوال الموجية حتى يشكل موجة مستقرة. يماثل ذلك بالضبط تكميم التحرك الزاوي للإلكترون الذي يتخذ قيما صحيحة من الثابت $\hbar$. فهل هناك علاقة ما بينهما يا ترى؟ على الأرجح هكذا كان يفكر الأمير الارستقراطي الفرنسي لوي فكتور دي بروي Louis de Broglie.

1-3 فرضية الأمير

في عام 1924 اقترح دي بروي فكرة أن المادة من الممكن أن تسلك سلوك ازدواجي, كما هو الحال في الضوء. انطلاقا من هذه الفرضية بدأت تتضح معالم التركيب الذري أكثر فأكثر. إن الفوتون الضوئي يمتلك كمية دفع تعطى بالعلاقة التالية:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \qquad (3-1)$$

واضح من هذه المعادلة بأنه توجد علاقة بين كمية الدفع والطول الموجي. تعطى كمية الدفع بالميكانيكا الكلاسيكية كالتالي:

$$p = mv \qquad (3-2)$$

اذن تصبح المعادلة (1-3) كالتالي:

$$\lambda = \frac{\mathrm{h}}{mv} \qquad (3-3)$$

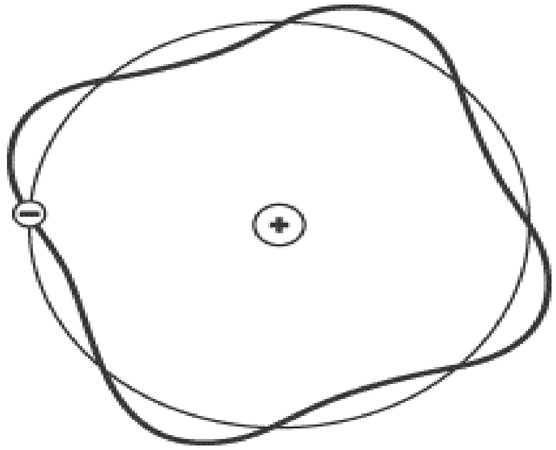
تعرف هذه المعادلة بطول موجة دي بروي للجسيم de Broglie wavelength of particle. تصلح هذه العلاقة للأجسام التي تمتلك سرعة صغيرة جدا بالنسبة لسرعة الضوء. لأننا استخدمنا هنا كمية الدفع من الميكانيكا الكلاسيكية وليست النسبية.

وجد دي بروي علاقة بين الموجات الموقوفة وكمية الدفع الزاوي. لو أخذنا أحد مدارات بور, وكان نصف قطره r ومحيطه $2\pi r$, يكون شرط الحصول على موجة موقوفة للإلكترون هو:

$$2\pi r = n\lambda \qquad (3-4)$$

أي يجب أن يكون محيط الدائرة مساويا لأعداد صحيحة من الطول الموجي وإلا فلن نحصل على موجة موقوفة (الشكل (2-3)). إذا وضعنا قيمة λ من المعادلة (3-3) في المعادلة (4-3) نحصل على:

$$mvr = n\hbar \qquad (3-5)$$



شكل (3-2)

كيفية تناسب محيط الدائرة مع أعداد صحيحة من الأطوال الموجية, حتى نحصل على موجة موقوفة. في هذا الشكل $n = 3$.

وليست هذه سوى فرضية بور الثانية في تكميم كمية التحرك الزاوي للإلكترون, المعادلة (2-24).

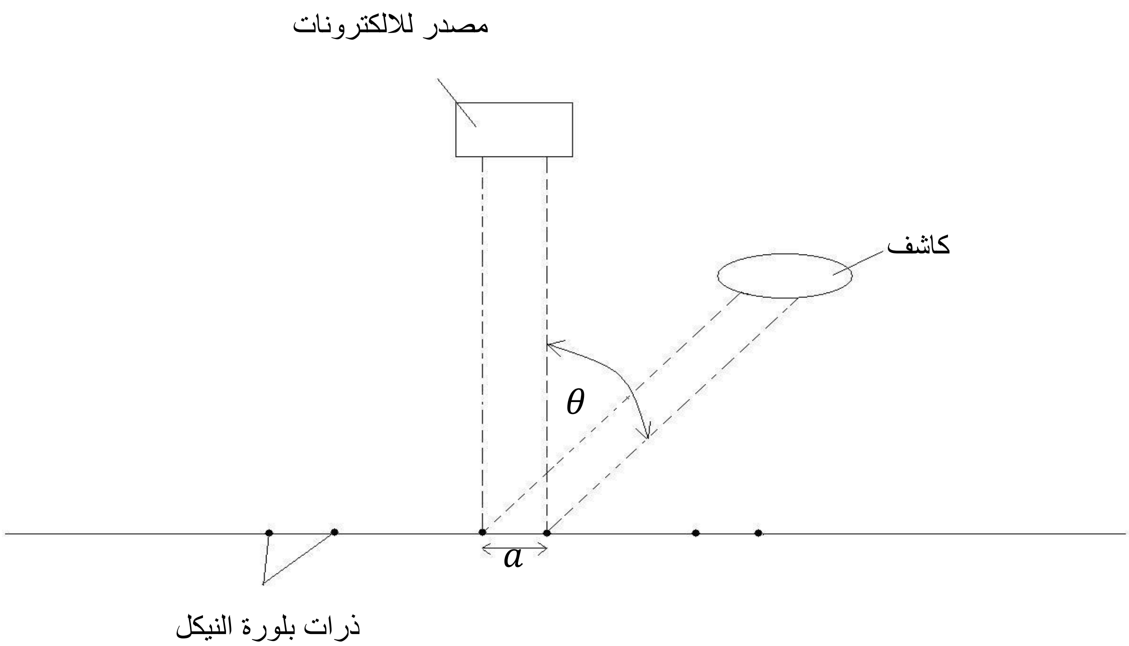
على الرغم من جمال كل هذه الأفكار, وتطابقها مع فرضية بور الثانية, عاد نفس السيناريو مرة أخرى, فلم تلاقي تلك الأفكار قبولا واسعا في البداية, واعتبرت أفكارا جنونية قائمة على أفكار جنونية أخرى وهي ذرة بور. ظل الوضع قائما هكذا حتى عام 1927 ليعيد التاريخ نفسه ولكن بشكل مقلوب. فكما تحرى كومتون عن جسيمات الأمواج الضوئية التي اقترحها أينشتين, تحرى هذه المرة المتحريان دافيسون وجيرمر Davisson and Germer عن موجات الجسيمات المادية والتي اقترحها دي بروي.

3-2 المتحريان دافيسون وجيرمر يكتشفان موجات الأمير

في عام 1927 جرت أولى التجارب للتأكد من صحة فرضية الأمواج المصاحبة للالكترونات. كان صاحبي هذه التجربة هم دافيسون وجيرمر, وكانا يعملان في مختبرات بل الهاتفية. الفكرة الرئيسية للتجربة تقوم على دراسة تداخل أمواج الالكترونات المنعكسة من سطح بلورة من النيكل.

يوضح الشكل (3-3) رسم تخطيطي للجهاز الذي استخدم للتجربة. يتكون الجهاز بشكل عام من مصدر للالكترونات يمكن به تغيير طاقة حركة الالكترونات, وقطعة من النيكل, وكاشف يقوم بتسجيل شدة الإشعاع كدالة في الزاوية θ المحصورة بين الشعاع الساقط والمنعكس.

إن ذرات بلورة النيكل تتخذ شكل وحدات مكعبة تفصل بينهما مسافات معينة a, كما هو موضح بالشكل نفسه. تقوم الفكرة الان على دراسة شدة الاشعاع, والذي يعتمد على كل من الزاوية θ وطاقة الحركة للالكترونات.



شكل (3-3)

رسم تخطيطي لجهاز دافيسون وجيرمر المستخدم في دراسة الأمواج الالكترونية.

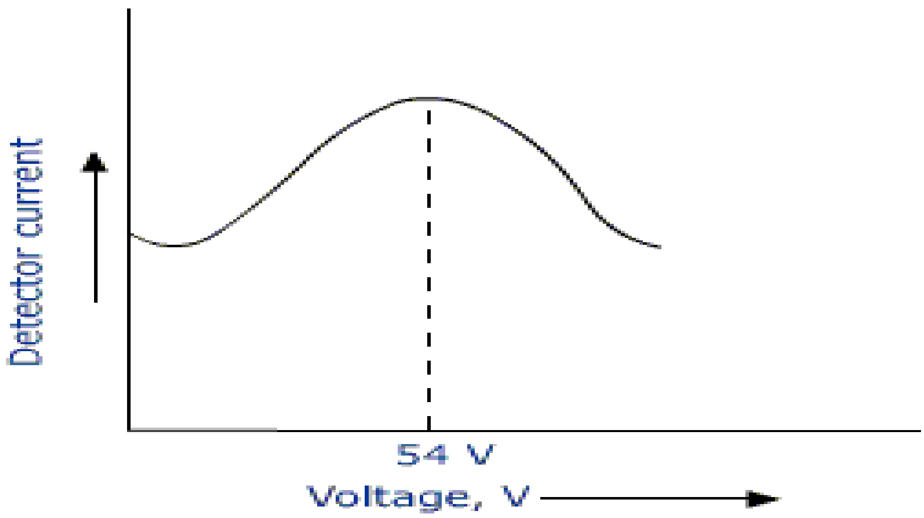
لو استخدمنا طاقة حركة مقدارها 5 ev, سنجد أن شدة الاشعاع تكون أكبر ما يمكن عندما تكون $\theta = 0$, بعدها تبدأ بالتناقص حتى تصل الى اقل قيمة عند $\theta = 35^\circ$, ثم تزداد حتى تصل الى اعلى قيمة لها عند $\theta = 50^\circ$, وبعدها تبدأ بالتناقص مرة أخرى وهكذا.إن هذا الأسلوب في التناقص والزيادة لا يمكن تفسيره إلا باستخدام فكرة تداخل الأمواج, حيث يكون التداخل بناء عند $\theta = 50^\circ$ وهدام عند $\theta = 35^\circ$.

إن شرط حدوث تداخل بناء يتم بتحقيق قانون براغ $Bragg's\ law$ والذي يعطى كالتالي:

$$a\ \sin\theta = m\lambda \qquad (3-6)$$

حيث a المسافات الفاصلة بين ذرات بلورة النيكل, m عدد صحيح, وهو لتحديد رتبة خطوط التداخل. لو استخدمنا الان المعادلة (3-6) لا يجاد الطول الموجي λ, بمعلومية a و الزاوية θ, سنجد انها بالضبط تعطي نفس الناتج لو اننا استخدمنا معادلة دي بروي (المعادلة (3-3)). يوضح الشكل (3-4) العلاقة بين شدة الإشعاع I و فرق الجهد V, حيث فرق الجهد هو المسؤول عن طاقة حركة الالكترونات أو كمية دفعها. تكون شدة الإشعاع أعلى ما يمكن عند $V = 54$, أي عندما تكون الزاوية θ تساوي 50°.

لقد كانت تلك التجربة أول دليل تجريبي لصدق فرضية دي بروي. وبعد عام واحد من اكتشاف دافيسون وجيرمر, أجرى طومسون G. P. Thomson ابن J. J. Thomson الذي اكتشف الالكترون, تجربة تداخل الامواج الالكترونية بعد نفاذها من شرائح رقيقة جدا. لقد اكتشف



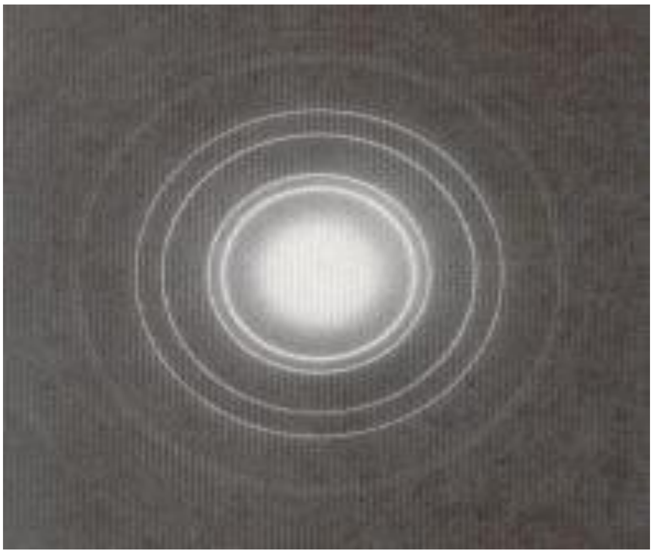
شكل (3-4)

العلاقة بين شدة الاشعاع I وفرق الجهد V, حيث تكون القيمة العظمى للشدة عند $V = 54$ أو $\theta = 50^{\circ}$.

طومسون الأب الإلكترون كجسيم, بيمنا اكتشفه الابن كموجة. إن ظاهرة تداخل الالكترونات قد تظهر على شكلين, إما على شكل حلقات كما هو في الشكل (3-5), أو على شكل نقاط مضيئة كما هو موضح بالشكل (3-6). السبب في ذلك يعتمد على تركيبة المواد التي تسقط عليها الالكترونات, فإذا ظهر شكل حلقات, تكون تركيبة البلورات الداخلية اسطوانية الشكل, بحيث تحتوي على جميع الاتجاهات الممكنة, وإذا ظهرت نقاط مضيئة, فان تركيبة المادة تكون عادية.

3-3 مثنوية الموجة والجسيم أو مبدأ التتام

بعد التجارب الكثيرة التي أجريت حول التأكد من صحة فرضية الأمواج المادية, بات إنكارها شيء صعب جدا. لكن السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو: ما هي الطبيعة النهائية للمادة؟ موجات أم جسيمات؟ إن المادة والطاقة وجهان لعملة واحدة, يتصرفان تحت ظروف معينة وكأنهما موجات, مثل تجربة الشق المزدوج وتصادم الالكترونات مع الشرائح البلورية الرقيقة جدا, وفي أحيان أخرى يتصرفان على أنهما سيل من الجسيمات, مثل التأثير الكهروضوئي بالنسبة للإشعاع, وجميع التصادمات الذرية بالنسبة للجسيمات المادية. لا نود هنا أن نتكلم عن الموجات الكهرومغناطيسية والجسيمات المادية وكأنهما شيئان مختلفان في الماهية, فكما بينا في السابق من النظرية النسبية الخاصة, أن المادة والطاقة متكافئتان تماما. هناك ظاهرة شهيرة تبين بوضوح صدق هذا المبدأ, تسمى ظاهرة الإنتاج الزوجي Pair Production التي تنبأ بها ديراك Dirac, عندما دمج النظرية النسبية الخاصة بميكانيكا الكم. تتنبأ النظرية بانحلال الإشعاع الكهرومغناطيسي (الفوتون) تحت ظروف معينة إلى إلكترون وبوزيترون positron, وهذا الاخير يشارك الالكترون في جميع خصائصه, الا أن شحنته موجبة, و من الممكن أيضا أن يحدث العكس, أي يندمج الإلكترون مع البوزيترون ليعطيان فوتون ضوئي. إذن لا فرق بين

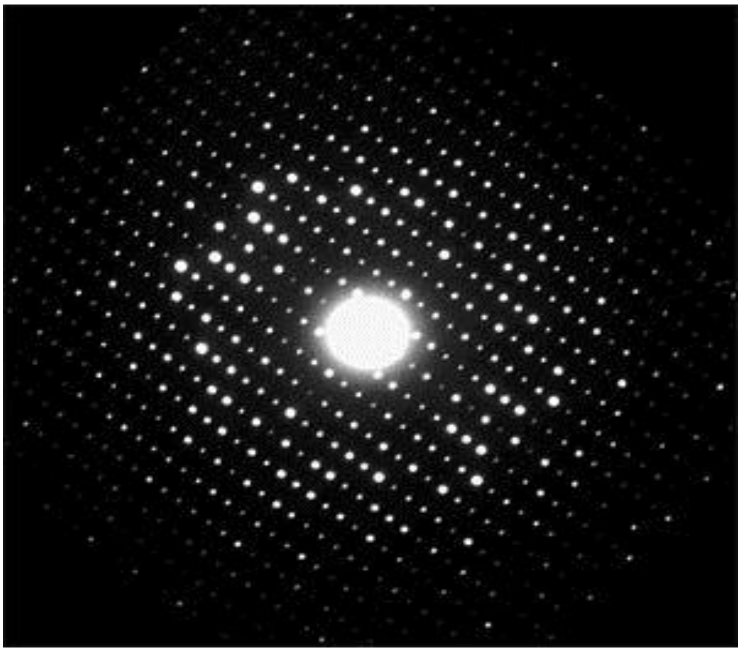


شكل (3-5)

تداخل موجات الإلكترون, معطية في النهاية شكل حلقات.

الإشعاع الكهرومغناطيسي أو الفوتونات (الطاقة) وبين الجسيمات الذرية جميعها (المادة). لنعد الآن إلى الإشكال الذي طرحناه منذ قليل: ما هي ماهية المادة أو الطاقة, أهي موجة أم جسيم؟ في الحقيقة لسنا أمام خيارات كثيرة, فالحل الأمثل هو قبول الاثنان معا, وهذا ما يسمى بالطبيعة المثنوية للموجة والجسيم $The\ wave-particle\ duality$. وهاتان الطبيعتان متممتان لبعض وليستا متناقضتان, فتظهر إحداهما في غياب الأخرى على حسب الظروف المتاحة, ولا يمكن رؤية الاثنتان معا في وقت واحد. إن الأمر يشبه كثيرا قطعة النقود المعدنية, فلا يمكنك رؤية الوجهان دفعة واحدة, وكلما رأيت صورة أحد الوجهين بشكل أفضل, ساءت رؤية الوجه الآخر حتى يختفي تماما. ستكون أفضل طريقة تفعلها لرؤية الوجهان معا, هي وضع القطعة المعدنية بشكل موازي لمستوى النظر, لكن وللأسف عندها لن ترى إلا جزء ضئيل من الوجهان. بكلمات أخرى, لقد أعطيت لكل وجه 50% من حسن واسائة النظر.

لعلك تتساءل لماذا إذن لا تظهر الأجسام العيانية العادية بشكل موجات؟ السبب في ذلك هو كبر كتل الأجسام العادية بالنسبة للأجسام الذرية. لو عدنا إلى معادلة دي بروي, المعادلة (3-3) لوجدنا أن هناك تناسب عكسي بين الكتلة وطول الموجة. إذا عوضنا عن m في المعادلة ذاتها بقيمة كبيرة جدا, يصبح الطول الموجي صغير جدا جدا, ولا يمكن الشعور به أبدا. إن المعادلة تحتوي على الثابت h, لذلك فالمعادلة مهمة حين يصبح ثابت بلانك مهما. وهذا ما رأيناه في نظرية بلانك حول اشعاع الجسم الاسود, ونظرية أينشتين في التأثير الكهروضوئي, ونظرية كومتون في الاستطارة, ونظرية بور حول الإلكترون. حيث تؤول تلك النظريات الى التقريب الكلاسيكي في الجمل التي يكون فيها ثابت بلانك مهملا. وهذا ما بيناه في مبدأ المقابلة الذي طرحه بور.



شكل (3-6)

تداخل موجات الالكترون, معطية في النهاية شكل نقاط مضيئة بشدات مختلفة.

الفصل الرابع

بزوغ ميكانيكا الكم أو نهاية ذرة بور

مقدمة

كانت فرضية دي بروي حول الطبيعة الموجية للجسيمات المادية بداية لاقتحام قوي من الفيزياء الكمومية على الفيزياء الكلاسيكية. لكن هذا الاقتحام لا يعني أن نرمي الفيزياء الكلاسيكية في سلة المهملات. بل كل ما في الأمر أنها قد تعدلت لتنسجم مع الصورة الجديدة للعالم. فالفيزياء الكلاسيكية هي تقريب للفيزياء الكمومية, كما بينا ذلك في مبدأ المقابلة.

أود أن أقول شيئا هنا قبل الخوض في غمار هذا الفصل. قد يكون مزعج للذي يقرأ النظرية الكمية أول مرة. إن كل ما تكلمنا عنه حتى هذه اللحظة يسمى بنظرية الكم القديمة. فلك أن تتصور كيف سيكون شكلها الجديد؟

لقد أدى اكتشاف الموجات المصاحبة للالكترونات إلى أمران في غاية الأهمية. بعد اكتشاف موجات الإلكترون, كان لابد من توصيف رياضي يتيح للإلكترون الانتقال من مدار إلى آخر ويشع فائض طاقته على شكل فوتون ضوئي. عندما أدخل اينشتين فكرة أن الضوء يمتلك جسيمات, وضح كيف أن الموجات الضوئية هي من يحدد كيفية انتقال الفوتون من مكان إلى آخر. الآن وبنفس الطريقة يجب أن تحدد موجات المادة كيفية انتقال الإلكترون من مدار إلى آخر داخل الذرة. بالتأكيد لا يمكن توصيف ذلك بواسطة الميكانيكا الكلاسيكية للموجات. بل كان لا بد من معادلات أخرى تنسجم مع أفكار الكم الجديدة تلك.

لقد تم ذلك بالفعل في عام 1926, عندما نشر العالم النمساوي ارفن شرودنغر Erwin Schrodinger نظرية خاصة تحدد كيفية انتشار أمواج المادة داخل الذرة. لقد صاغ نظريته على شكل معادلة شهيرة جدا عند الفيزيائيين, تسمى (معادلة شرودنغر) Schrodinger Equation. وهذا هو أول الأمران الهامين.

كانت الفيزياء الكلاسيكية تفترض أن الجسيم المادي يمكن تمثيله على شكل نقطة, وبالتالي يمكن توصيف موقع هذا الجسيم وكمية حركته في أي لحظة بواسطة ثلاث إحداثيات مع ثلاث مركبات للسرعة, ويتم كل ذلك بدقة. لكن الوضع قد انقلب رأسا على عقب بعد اكتشاف الموجات المصاحبة للإلكترون. فإمكانية تمثيل الجسيم المادي على شكل موجات في المستوى الذري يفرض بعض القيود لتحديد بعض خواص الجسيم في وقت واحد, كالموقع وكمية الحركة. كان الفيزيائي الألماني ورنر هايزنبيرغ Werner Heisenberg هو أول من فطن الى هذه الظاهرة, وصاغها في مبدأ مشهور, وهو (مبدأ اللايقين) Uncertainty Principle. ثاني الأمران الهامين.

كان لاكتشاف هذان الأمران, بداية لحقبة جديدة في الفيزياء الكمومية. وقد دعيت تلك الفترة وما بعدها بالاسم المرعب (ميكانيكا الكم) *Quantum Mechanics*.

توصف ميكانيكا الكم عادة, بأنها قد اكتشفت مرتان. المرة الأولى كانت بواسطة هايزنبيرغ في عام 1925, وقد صاغ نظريته على شكل مصفوفات Matrices. والمرة الثانية كانت بواسطة شرودنغر في عام 1926, وقد صاغ نظريته على شكل موجات ميكانيكية. وفيما بعد برهن

شرودنغر على الصورتان متكافئتان رياضيا, وتعطيان نفس النتائج بالنهاية. لكن طريقة الموجات الميكانيكية أسهل رياضيا من المصفوفات.

سنقوم في هذا الفصل بشرح أساسيات ميكانيكا الكم, ولكن بدون الدخول الى تفاصيلها الرياضية الطويلة. حيث أن رياضيات ميكانيكا الكم ليست بمثل رياضيات الفصول السابقة. فهي تتطلب حسابات رياضية طويلة جدا ومعقدة أحيانا, لذلك لا أرغب في إدخالها ضمن هذا الكتاب, وسأكتفي بشرح الأساسيات فقط.

1-4 الدالة الموجية أو بداية الضباب

لقد بينا من نظرية دي بروي إمكانية تمثيل الجسيم المادي بموجة موقوفة, لكن تلك النظرية مهتمة بدراسة الموجة في بعد واحد, وهو الانتقال حول محيط المدار داخل الذرة.

استخدم شرودنغر تلك الأفكار, وطور دراسة هذه الأمواج من بعد واحد إلى ثلاثة أبعاد . في ظل الميكانيكا الموجية يتم وصف ودراسة جميع خصائص الجسيم المادي, كالموقع وكمية الدفع وطاقة الحركة وغيرهما عن طريق ما يسمى بالدالة الموجية wave function. يرمز لهذه الدالة بالرمز $\psi(\vec{r},t)$, وهي كما نرى دالة في الموقع والزمن. ان المعادلة التي تصف تطور هذه الدالة مع الزمن في الأنظمة الفيزيائية هي معادلة شرودنغر.

لماذا اخترنا عنوان (بداية الضباب) لهذا الجزء؟ السبب بسيط, وهو أن تخيل دالة موجية في الواقع أمر صعب جدا. فالموجات التي تصف الإلكترون هنا لا يمكن تشبيهها بأي طريقة كانت, بالموجات الصوتية أو موجات الماء أو حتى الموجات الكهرومغناطيسية. فهي وصف رياضي تجريدي بحت قابع داخل الدالة $\psi(\vec{r},t)$. اضافة الى ذلك فأنه لا يوجد فضاء فيزيائي واضح تنتشر فيه تلك الموجات. فموجات الماء تحتاج الى ماء حتى تنتشر فيه, والصوت يحتاج إلى هواء حتى ينتشر فيه [1], لكن الإلكترون ينتشر في ماذا؟ إذا كنت تتصور انه ينتشر بالفراغ الذي حول الذرة, فما هو ذلك الفراغ؟ إننا نتكلم عن اصغر وحدات الكون, فإذا تخيلت وجود فراغ فأن هذا الفراغ يتكون من ذرات ونحن نتكلم عن اصغر مكونات الذرة وهو الإلكترون!.

يجب على القارئ الآن أن يبدأ بنزع صورة الإلكترون كجسيم يدور حول النواة, كما في نموذج بور. وكذلك فكرة الموجات الأحادية البعد المستقرة كما تصورها دي بروي. وإذا أصررت على تخيل شكل معين للإلكترون, فبإمكانك أن تتخيل ضباب كثيف يحيط بالشمس, حيث الضباب هو الإلكترون والشمس هي النواة.

2-4 شرودنغر يصوغ قانون نيوتن الثاني على طريقته الضبابية

ذكرنا منذ قليل أن المعادلة التي تصف تطور الدالة الموجية $\psi(\vec{\mathrm{r}},\mathrm{t})$ مع الزمن, تسمى بمعادلة شرودنغر. ان هذه المعادلة هي عصب ميكانيكا الكم, وتناظر بالضبط قانون نيوتن الثاني في الميكانيكا الكلاسيكية, والذي يصف تطور حالة الجسم العادي مع الزمن.

أحد فروض ميكانيكا الكم الأساسية ينص على (لكل كمية فيزيائية يمكن قياسها, هناك مؤثر أو معامل operator مناظر لها). مثلا, مركبة كمية الدفع الخطية p_{x} لها مؤثر مناظر هو $p_{\mathrm{x}}=-\mathrm{i}\hbar\frac{\partial}{\partial\mathrm{x}}$, حيث $i=\sqrt{-1}$. نلاحظ أن المؤثر يحتوي على عملية رياضية وهي الاشتقاق. المؤثر المناظر لطاقة الوضع (الجهد) هو نفسه, أي $\hat{V}=V$. مؤثر الطاقة الكلية هو $E=i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$.

الآن, نعلم من قوانين الفيزياء الكلاسيكية أن الطاقة الكلية لأي جسم تساوي طاقة الحركة مضافا إليها طاقة الوضع:

$$E = T + V \qquad (4-1)$$

نضع الآن المؤثرات المناظرة لكمية الدفع والجهد والطاقة الكلية, مع استخدام $T = \frac{p^2}{2m}$, ثم نقوم بضرب الطرفين ب ψ:

$$i\hbar \frac{d\psi(x)}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x) \qquad (4-2)$$

وهذه هي معادلة شرودنغر الشهيرة, في بعد واحد وهو x. وكما نرى هي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية.

تلعب هذه المعادلة نفس الدور الذي يلعبه قانون نيوتن الثاني $F = ma$, في الميكانيكا الكلاسيكية. فلو تحرك جسم في اتجاه x مثلا, فاننا نستطيع التنبؤ بموقعه عند أي لحظة من الزمن, اذا ما علمنا شروطه الابتدائية. بنفس الطريقة تحدد معادلة شرودنغر تطور الدالة ψ عند أي لحظة من الزمن, بمعلومية الشروط الابتدائية, ولكن بالحدود التي يسمح بها مبدأ عدم اليقين الذي سنتطرق له في هذا الفصل.

4-3 التفسير الاحتمالي أو بداية اللعب بالنرد

إذا كانت معادلة شرودنغر معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية, فمعنى ذلك بأن المعادلة تحل رياضيا لتعطي في النهاية الدالة الموجية $\psi(\vec{r},t)$. لكن هذه الدالة الموجية بصورة عامة هي دالة عقدية complex function , وبالتالي لا تعطي معنى فيزيائي واضح. فالعدد المركب i يساوي $\sqrt{-1}$, ونحن نعلم بأنه لا توجد كمية سالبة في العالم الفيزيائي. لذلك لم يشعر الفيزيائيين بالارتياح آنذاك تجاه هذه المعادلة الرياضية البحتة. لكن ماكس بورن Max Born رأى الموضوع بشكل اخر, فبدلا من أن يرى أن الدالة $\psi(\vec{r},t)$ تمثل موجة إلكترون, افترض أن هذه الدالة الاخيرة مجرد دالة احتمال!.

إذا كانت الدالة $\psi(\vec{r},t)$ دالة عقدية ولا تعطي أي معنى فيزيائي, فأن مربع هذه الدالة يعطي معنى فيزيائي, وهو احتمال تواجد الالكترون بين الموقعين x و $x + dx$ عند أي لحظة من الزمن:

$$P(x,t) = |\psi(x,t)|^2 dx \qquad (4-3)$$

حيث $P(x,t)$ كثافة الاحتمال. اذا أردنا الحصول على احتمالية تواجد الجسيم في المنطقة الخطية الواقعة بين النقطتين a و b, نقوم بتكامل المعادلة (4-3) بالحدود a و b:

$$P(x,t) = \int_a^b |\psi(x,t)|^2 dx \qquad (4-4)$$

طالما أن هذا التكامل يعطي احتمالية تواجد الجسيم في مدى معين, إذن يجب أن يمتلك هذا التكامل قيمة محددة. لذلك إذا انعدمت قيمة التكامل عند كل نقاط الفضاء:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x,t)|^2 \mathrm{d}x = 0 \qquad (4-5)$$

فهذا يعني أن الجسيم المادي لا وجود له عند أي لحظة زمنية في جميع مدى الفضاء على المحور x, وهذا غير ممكن طبعا. أما إذا كانت قيمة التكامل لا نهائية:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x,t)|^2 \mathrm{d}x = \infty \qquad (4-6)$$

فهذا يعني أن الجسيم موجود في كل مكان وعند كل لحظة, وهذا أيضا غير ممكن ولا معنى له. لذلك يجب أن يكون هناك شرط رياضي حتى يتواجد الجسيم في مكان ما في الفضاء وفي لحظة ما. يعطى ذلك الشرط كالتالي:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x,t)|^2 dx = 1 \qquad (4-7)$$

وتسمى هذه المعادلة بشرط المعايرة normalizing condition, وتعني ببساطة أن الجسيم يكون موجود بالفعل في مكان ما ولحظة ما في الفضاء. تمثل هذه العلاقة الأخيرة أحد أهم الشروط الهامة في ميكانيكا الكم, وتستخدم كثيرا لحل المسائل الرياضية. يطلق على الدالة الموجية التي تحقق تلك العلاقة بالدالة الموجية المعايرة.

كان اقتراح ماكس بورن غير اعتيادي على الإطلاق, فلقد أصبحنا غير قادرين على تحديد موقع إلكترون داخل الذرة, مثلما نحن غير قادرون على تحديد الوجه الذي تتخذه قطعة النرد عند سقوطها. إن كل ما نستطيع قوله الآن, أن احتمالية تواجد الإلكترون في المدى كذا هو كذا بالمائة, والمدى الأخر هو كذا بالمائة وهكذا. أي أن الأمور جميعها قد تحولت إلى إحصاء.

من هنا بدأت الكوابيس المزعجة عن جوهر الطبيعة الذرية تراود الفيزيائيين, فهل الكون في أصغر لبناته عبارة عن طاولة نرد كبيرة, وكل شيء فيها يدبر بضربة حظ.

لقد استمر البحث والتفسير, حتى جاء مبدأ أخطر من كل ما ذكرناه حتى الآن, مبدأ من شأنه أن يغير أفكارنا تماما عن الكون, مبدأ ينص وبكل بساطة على أن: عندما توجد الحركة يختفي الموضع, وعندما يوجد الموضع تختفي الحركة **!!**

4-4 مبدأ هايزنبيرغ الارتيابي

ذكرنا في مقدمة الفصل الأول, كيف كانت صورة الكون حتى نهاية القرن التاسع عشر. فبضل أعمال نيوتن ومن سبقوه وتبعوه, بات الكون آلة عظيمة, كل شيء فيها قائم على السبب

والمفعول, حيث لا مكان للمصادفة فيه. إن القوانين التي نمتلكها تتيح لنا معرفة حركة أكبر المجرات إلى اصغر الذرات في المستقبل, فقط إذا ما علمنا شروط حركتها الابتدائية, من حيث المبدأ على الأقل.

لكن هايزنبيرغ تحدى ذلك, و وضع مبدأ غير به صورة تلك الآلة الكونية إلى الأبد. ينص ذلك المبدأ على التالي: لا يمكن تحديد موقع واندفاع جسيم ما في وقت واحد, وكلما رصدت أحدهما بدقة أكبر كان على حساب الأخر بنفس الدقة. أي, كلما اقتربت من القيمة الحقيقية للموقع, كلما ابتعدت عن قيمة كمية الدفع بقدر اقترابك من معرفة الموقع. لكن كيف يكون ذلك؟

إذا أردنا أن نشاهد أي شيء, فعلينا أن نسلط عليه ضوء, حيث يصطدم الضوء بالجسم وينعكس على عينينا فتتم عملية الرؤية. لكن إذا أردنا أن نشاهد إلكترون داخل الذرة فماذا نفعل؟ أيضا نسلط عليه ضوء, لكن المشكلة تظهر هنا, فالإلكترون ليس بالجسم الكبير, لذلك سنحتاج إلى مجهر حتى نرى الإلكترون, ولكن المجهر ليس سوى تكبير للصورة بالتقاط الأشعة التي كانت ذاهبة في الأصل باتجاهات شتى. لكي نرى الصورة بشكل واضح يجب استخدام مجهر ذي عدسة عريضة, وطول موجي قصير جدا, لكن يجب عليك بالمقابل أن تدفع ثمن فقد المعلومات عن ارتداد الإلكترون. فعندما نستخدم طول موجة قصير, يؤدي ذلك إلى زيادة في كمية دفع الفوتون, حسب العلاقة (19-1), وبالتالي سيضرب الفوتون الإلكترون بعنف شديد, وهذا يؤدي إلى فقد المعلومات عن كمية دفعه. فالفوتون بعد أن يصطدم بالإلكترون بإمكانه أن يدخل العدسة من أي نقطة. الآن, إذا أردنا أن نحسب كمية دفع الإلكترون بدقة, سنستخدم عدسة ضيقة, مع طول موجي طويل, لكن هذا سيؤدي إلى صورة مجهريه ضبابية, وبالتالي سنفقد المعلومات عن موضع الإلكترون.

الخلاصة هي أنك لا تستطيع تحديد موقع واندفاع الإلكترون في وقت واحد مهما فعلت. لقد عبر هايزنبيرغ عن ذلك رياضيا بعلاقته الشهيرة:

$$\Delta_x \Delta_p \geq \frac{\hbar}{2} \qquad (4-8)$$

حيث Δ_x نسبة اللايقين أو الخطأ في الموقع, و Δ_p نسبة اللايقين في الدفع. ويطلق على هذا المبدأ اسم (مبدأ عدم اليقين) Uncertainty Principle.

إلى هنا, يجب على القارئ أن ينتبه بأنه لا توجد أي طريقة لرصد الإلكترون مباشرتا, كأن تقول انه هنا أو هناك, إن أفضل ما تستطيع قوله, هو أين كان وليس بالضبط.

نكرر قولنا هنا مرة أخرى عند اكتشاف كل نظرية تتعلق بثابت بلانك, فمبدأ عدم التحديد لا يتم تطبيقه على الأنظمة العيانية, فهو ذو تأثير فقط في حالة الجسيمات الذرية. أما في الأجسام العادية فيصبح تقريبا $\Delta_p \cong 0$ و $\Delta_x \cong 0$, أي توجد نسبة خطأ صغيرة جدا جدا وبالتالي يمكن اهمالها, بذلك يصبح المبدأ في الحالة الكلاسيكية كالتالي:

$$\Delta_p \Delta_x \geq 0$$

ولكن في الحالة الكمية كما رأينا يكون الناتج أكبر أو يساوي ثابت وهو $\frac{\hbar}{2}$.

5-4 المعالجة الجديدة لذرة الهيدروجين أو نهاية ذرة بور

لقد قمنا بمعالجة ذرة الهيدروجين وهي أبسط الذرات وأكثرها انتشارا في الطبيعة عن طريق نظرية الكم القديمة, وتحديدا من نموذج بور. كان هذا النموذج الأخير يقتضي وجود نواة مكونة من بروتون واحد وإلكترون واحد يدوران حول بعضهما البعض, وبسبب ضخامة حجم النواة (البروتون في حالة ذرة الهيدروجين) بالنسبة للإلكترون, اعتبرنا أن النواة ساكنة و الإلكترون يدور حولها.

لكن هذه الصورة البسيطة للذرة تخترق المبدأ الذي تكلمنا عنه منذ قليل, مبدأ عدم اليقين. إذ لو كان الإلكترون يدور بشكل دائري حول النواة, لكان في مقدورنا أن نحدد كل من موقعه واندفاعه في وقت واحد, وهذا تعارض مباشر مع مبدأ عدم اليقين.

تم إعادة النظر في معالجة ذرة الهيدروجين, انطلاقا من نظرية الكم الحديثة (ميكانيكا الكم), تحديدا من معادلة شرودنغر, وتفسر بورن الاحتمالي, ومبدأ هايزنبيرغ الارتيابي. باستخدام هذه المفاهيم الجديدة نحصل على شكل جديد للذرة, يختلف تماما عن نموذج بور, ولكن يتفق بصورة جيدة مع التجارب. لكن نموذج بور لم يمت بالكامل, بل كل ما في الأمر انه يظهر كحالة من إحدى الحالات الكثيرة التي تظهر من نتائج نظرية ميكانيكا الكم, كما سنرى الآن [1].

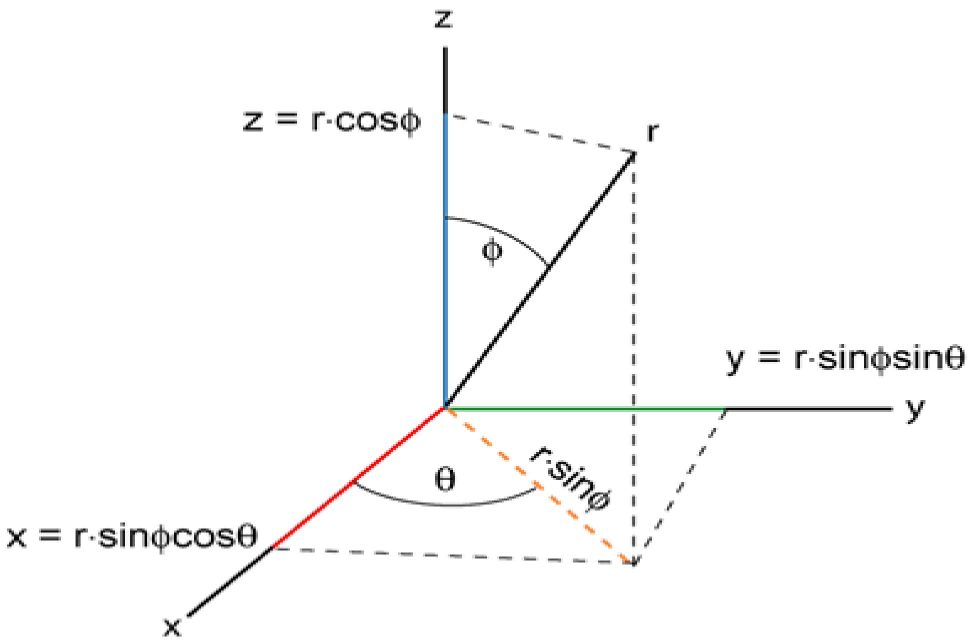
سوف أقدم هنا النتائج النهاية لتصورات ميكانيكا الكم لذرة الهيدروجين, فكما نوهنا في السابق بأن المعالجة الرياضية الكاملة لميكانيكا الكم ليست يسيرة و واضحة. لذا سوف أحاول هنا تقديم صورة رياضية بسيطة وموجزة للنظرية.

عند التعامل مع الإلكترون كشيء متحرك حول النواة, فانه لا يتم استخدام الإحداثيات الكارتيزية, بل يتم استخدام الإحداثيات الكروية القطبية spherical polar coordinates. يوضح الشكل (1-4) الإحداثيات الكروية وعلاقتها بالإحداثيات الكارتيزية.

بينا في ما مضى أن معادلة شرودنغر هي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية, وتحل هذه المعادلة لتعطي في النهاية الدالة ψ. في حالة ذرة الهيدروجين سيكون الحل النهائي للدالة ψ مساويا لحاصل ضرب دالتين:

$$\psi_{nlm}(\mathrm{r},\theta,\phi) = \mathrm{R}_{nl}(r)\mathrm{Y}_{lm}(\theta,\phi) \qquad (4-9)$$

حيث n هو عدد الكم الرئيسي, و قد تكلمنا عنه في نموذج بور. l يسمى عدد الكم المداري $orbital\ quantum\ number$, و m يسمى عدد الكم المغناطيسي $magnetic\ quantum\ number$, وهما عددان جديدان ينتجان من حل معادلة شرودنغر. تسمى الدالة $R_{nl}(r)$ بالدالة النصف قطرية $radial\ function$, وهي كما نلاحظ دالة في نصف القطر r (بعد النواة عن الالكترون). يعطى الناتج النهائي لهذه الدالة في حالة ذرة الهيدروجين كالتالي:



شكل (4-1)

العلاقة بين الإحداثيات الكروية والكارتيزية.

$$R_{nl}(r) = \frac{1}{r}\,\rho^{l+1}e^{-\rho}\,H(\rho) \qquad (4-10)$$

حيث $\rho = \frac{r}{an}$, و a هو نصف قطر بور. أما $H(\rho)$ فهي حدودية من الدرجة:

$$k_{max} = n - l - 1 \qquad (4-11)$$

وتساوي

$$H(\rho) = \sum_{k=0}^{k_{max}} a_k\,\rho^k \qquad (4-12)$$

وتحدد معاملاتها بالعلاقة التالية:

$$a_{k+1} = \frac{2(k - k_{max})}{(k+1)(k+2l+2)}\,a_k \qquad (4-13)$$

وطالما أن $k_{max} \geq 0$, إذن يجب أن يكون بحسب العلاقة (4-11) أن:

$$n \geq l + 1 \qquad (4-14)$$

وكذلك طالما أن $l \geq 0$, فيجب أن يكون:

$$n \geq 0$$

وهذا يفسر لنا الآن ما رأيناه في نموذج بور, من أن أقل مستوى طاقة للإلكترون هو $n = 1$ و ليس $n = 0$.

يتبقى لنا الآن الدالة $_{lm}(\theta, \phi)$, تسمى هذه الدالة بالدالة الكروية التوافقية *spherical harmonic function*, ويعطى الناتج النهائي لها كالتالي:

$$Y_{lm}(\theta,\phi) = (-1)^m \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}}\ \mathrm{P}_l^m(\cos\theta)e^{im} \qquad (4-15)$$

تسمى $P_l^m(\cos\theta)$ بحدودية لاجندر Legendre polynomial, وتعطى بصورة عامة كالتالي:

$$P_l^m(u) = (-1)^{l+m}\frac{(l+m)!}{(l-m)!}\frac{(1-u^2)}{2^l l!}\left(\frac{d}{du}\right)^{l-m}(1-u^2)^l \qquad (4-16)$$

حيث u اي دالة عامة. في حالتنا هنا نجد $u = cos\theta$.

نلاحظ من الدالة $R_{nl}(\mathrm{r})$ انها فقط تعتمد على عدد الكم الرئيسي n و المداري l, وهي دالة خاصة بالحركة النصف قطرية, أي تحدد كيفية تغير نصف القطر r حول النواة. اما الدالة $Y_{lm}(\theta,\phi)$ فهي ترتبط بعدد الكم المداري l و المغناطيسي m, وهي دالة خاصة بالحركة الزاوية, أي تحدد كيفية تغير الزاوية θ فقط, لان الزاوية ϕ تعتبر ثابته وسوف نبين ذلك عند دراسة كثافة الاحتمال.

للحصول على الشكل النهائي للدالة الموجية لذرة الهيدروجين, نقوم بتعويض العلاقتين (4-10) و (4-15) في (4-9):

$$\psi_{nlm}(\mathrm{r},\theta,\phi) = \frac{1}{\mathrm{r}}\rho^{l+1}e^{-\rho}H(\rho)(-1)^m\sqrt{\frac{2l+1}{4\pi}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}}P_l^m(cos\theta)e^{im\phi}$$

لاحظ أن هذه الدالة الموجية التي تصف إلكترون حقيقي يدور حول النواة, تحتوي على العدد المركب $i = \sqrt{-1}$, وهذه نقطة اثارت تساؤلات وحيرة حول كيفية وصف المعادلات الرياضية للأنظمة الفيزيائية, اذ كيف تصف دالة مركبة نظام فيزيائي حقيقي؟ ان الحل الوحيد لهذه المشكلة هو اقتراح ماكس بورن الذي ذكرناه في السابق, فالدالة الناتجة من حل معادلة شرودنغر لا تحمل في حد ذاتها معنى فيزيائي محدد, ولكن مربع هذه الدالة يعطي معنى فيزيائي, وهو احتمال تواجد الإلكترون في مكان ما.

عند دراسة نظام معين في ميكانيكا الكم, تجرى جميع العمليات الرياضية لإيجاد شيئين مهمين, وهما الدالة المميزة *eigenfunction* والقيمة المميزة *eigenvalue*. في حالة ذرة

الهيدروجين تكون الدالة المميزة هي الدالة الموجية المعطاه بالعلاقة (4-17), أما القيمة المميزة فهي تعبر عن قيمة طاقة المدارات E_n. تعطى تلك القيمة المميزة بشكلها النهائي كالتالي:

$$E_n = -\frac{kz^2me^4}{2n^2\hbar^2} \qquad (4-17)$$

وليست هذه سوى معادلة صديقنا القديم بور, المعادلة (2-33). الآن, يتبين لنا سبب فشل نموذج بور على الحالات الأكثر تعقيدا من ذرة الهيدروجين, فلقد كان نموذج بور خليط ما بين الفيزياء الكلاسيكية والكمومية. أما الآن في ميكانيكا الكم, لم نستخدم أي شيء من الميكانيكا الكلاسيكية, وقد أتت نظرية بور كحالة خاصة لميكانيكا الكم.

بعد معرفة الدالة المميزة والقيمة المميزة, سنقوم بدراسة أبسط حالات الطاقة, وذلك عندما يكون الإلكترون في مستوى الطاقة الأول$1 = n$. عندما تكون $n = 1$, نجد من المعادلة (4-14) $l = 0$, وفي هذه الحالة تكون ايضا $m = 0$. بالتعويض عن قيمة $n = 1$ و $l = 0$ في المعادلة (4-11) نجد أن $k_{max} = 0$. نقوم الان بالتعويض في المعادلة (4-13) مع استخدام $k = 0$, نجد أن $a_1 = 0$, وهذا يعني من المعادلة (4-12) أن الحدودية $H(\rho)$ لا تملك سوى معامل واحد وهو $a_\circ$. تصبح الدالة $R_{nl}(r)$ في هذه الحالة كالتالي:

$$R_{nl}(r) = \frac{a_\circ}{a} e^{\frac{-r}{a}} \qquad (4-18)$$

بالمثل نجد الدالة المميزة باستخدام $l = 0$ و $m = 0$ في المعادلة (4-16) أولا:

$$P_0^0(\cos\theta) = 1$$

وبتعويض الناتج في المعادلة (4-15) نجد أن:

$$Y_{00} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \qquad (4-19)$$

بعد معرفة شكل الدالتين النصف قطرية والكروية التوافقية, يصبح الشكل النهائي للدالة المميزة لذرة الهيدروجين في مستوى الطاقة الأول كالتالي:

$$\psi_{100}(\mathrm{r}, \theta, \phi) = \frac{a_\circ}{a} e^{-\frac{r}{a}} \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \qquad (4-20)$$

نستخدم الآن شرط المعايرة, المعادلة (4-7) لإيجاد الثابت $a_\circ$:

$$\int_0^\infty r^2 \, |R_{nl}(r)|^2 dr \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin\theta \, |Y_{lm}(\theta, \phi)|^2 d\theta d\phi = 1 \qquad (4-21)$$

وطالما أن التكامل حول الدالة التوافقية الكروية يساوي واحد, تصبح المعادلة كالتالي:

$$\int_0^{\infty} r^2 |R_{nl}(r)|^2 dr = 1 \qquad (4-22)$$

من هذه المعادلة نجد أن $\sqrt{\frac{4}{a}} = a_{\circ}$, وبهذا يكون الشكل النهائي للدالة الموجية لالكترون ذرة الهيدروجين في مستوى الطاقة الاول $n = 1$ كالتالي:

$$\psi_{100}(\mathrm{r}, \theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-\frac{r}{a}} \qquad (4-23)$$

وتكون قيمة مستوى الطاقة الأول من المعادلة (4-18):

$$E_1 = -13.6 \ \text{ ev} \qquad (4-24)$$

وهي بالضبط نفس القيمة التي وجدناها في نموذج بور.

بينا قيما سبق أن نموذج بور ينتهك مبدأ عدم اليقين, وهو أحد الدعائم الرئيسية في نظرية ميكانيكا الكم. إذ لو كان الإلكترون يدور بشكل دائري أو بيضاوي لاستطعنا تحديد كل من موقعه وسرعته في آن واحد, ولكن هذا يخالف مبدأ عدم اليقين. كذلك يخالف نموذج بور التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم, لقد وجدنا أن مربع الدالة الموجية الآتية من حل معادلة شرودنغر يتناسب مع احتمال تواجد الإلكترون في أماكن معينة وليس في مكان محدد بالضبط. إذن في ذرة الهيدروجين قد يكون الإلكترون على بعد يساوي البعد الذي تنبأ به بور (نصف قطر بور), لكن هذا لا يعني بأنه يوجد على هذا البعد دائما, فالتفسير الاحتمالي يعطي إمكانية للإلكترون بالتواجد على بعد أكبر أو أصغر من نصف قطر بور وباحتمالات متعددة. وهذا ما سنراه الآن.

لنأخذ أولا تربيع الدالة $R_{nl}(r)$, وهذه تعطينا الاحتمالية النصف القطرية (بعد الإلكترون عن النواة r). اذا عرفنا $P(r)dr$ على انها احتمالية تواجد الالكترون بين المسافة r و $r + dr$ عن النواة, فانه بحسب التفسير الاحتمالي يكون لدينا:

$$\int_0^{\infty} P(r) dr = 1 \qquad (4-25)$$

وبمقارنة هذه المعادلة مع المعادلة (4-22) نجد أن:

$$P(r) = r^2 |R_{nl}(r)|^2 \qquad (4-26)$$

وتعطي هذه المعادلة كثافة الاحتمال الطولية أو النصف قطرية. طالما أن $P(r) \propto r^2 e^{\frac{-2r}{a}}$, يكون أكبر احتمال لتواجد الالكترون في الحالة الارضية $n = 1$, هو:

$$\frac{dP(r)}{dr} = \frac{2}{a^{\frac{3}{2}}} \left[2re^{\frac{-2r}{a}} - \left(\frac{2}{a} e^{\frac{-2r}{a}} r^2 \right) \right] = 0 \qquad (4-27)$$

ولا تتحقق هذه المعادلة إلا عندما $r = a$, أي أن اكبر احتمال لتواجد إلكترون ذرة الهيدروجين في المستوى الأرضي $n = 1$ هو نصف قطر بور, مما يبين لماذا كان نموذج بور ناجح في حالات الذرة وحيدة الالكترون. يوضح الشكل (4-2) كثافة الاحتمال النصف قطرية $P(r)$ للحالة الارضية وبعض حالات الاثارة كدالة في $\frac{r}{a}$.

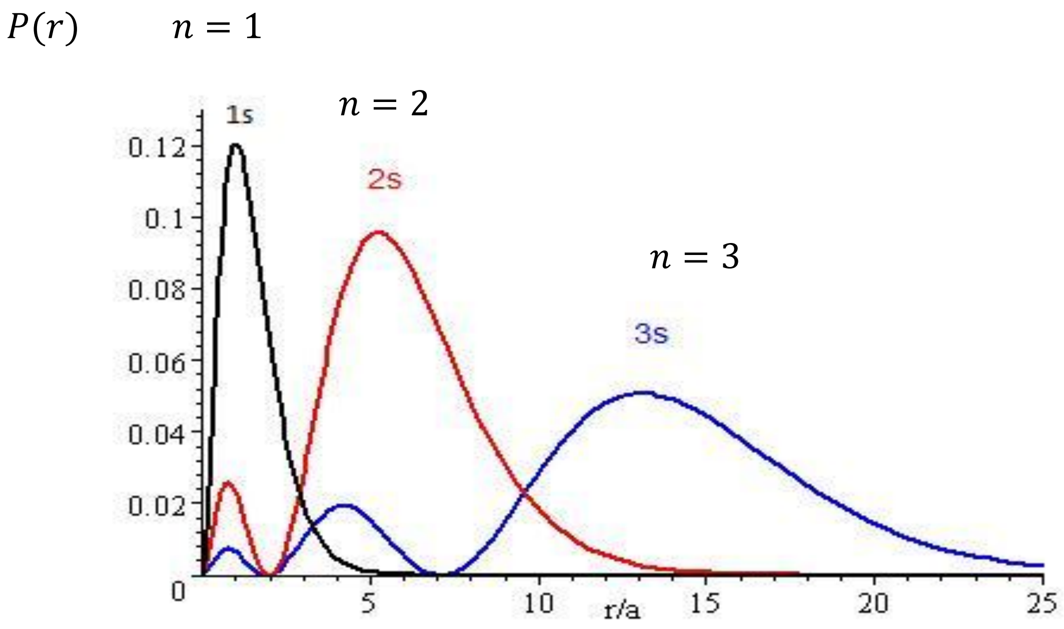
لم تنته الأمور عند هذا الحد, فيجب النظر في كثافة الاحتمال الزاوية للدالة الكروية التوافقية $Y_{lm}(\theta, \phi)$. لحسن الحظ في هذه الحالة, أي عندما تكون $l = 0$ و $m = 0$, فان كثافة الاحتمال لا تعتمد لا على الزوايا θ ولا على ϕ, لذلك يكون مربع الدالة $Y_{lm}(\theta, \phi)$ يساوي مقدار ثابت:

$$P(\theta, \phi) = |Y_{lm}(\theta, \phi)|^2 = constant \qquad (4-28)$$

وبالتالي يصبح شكل دالة كثافة الاحتمال متناظر كرويا ولا يعتمد على θ أو ϕ, كما هو موضح بالشكل (4-3).

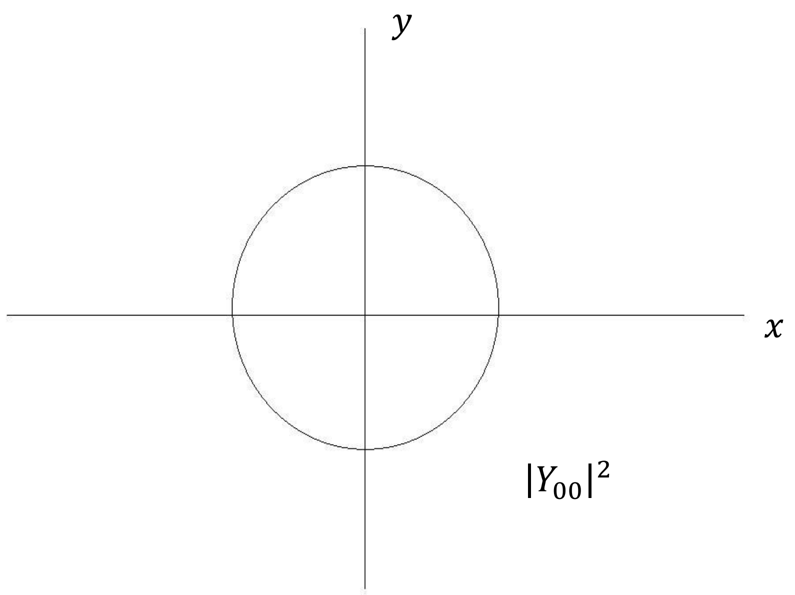
الآن وللحصول على الشكل النهائي لكثافة الاحتمال, نقوم بضرب المعادلتين (4-26) و (4-28)

$$P(r, \theta, \phi) = r^2 |R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \phi)|^2 = |\psi(r, \theta, \phi)|^2 \qquad (4-29)$$



شكل (4-2)

توزيع دالة كثافة الاحتمال $P(r)$ للحالة الأرضية, وبعض حالات الاثارة كدالة في r/a .

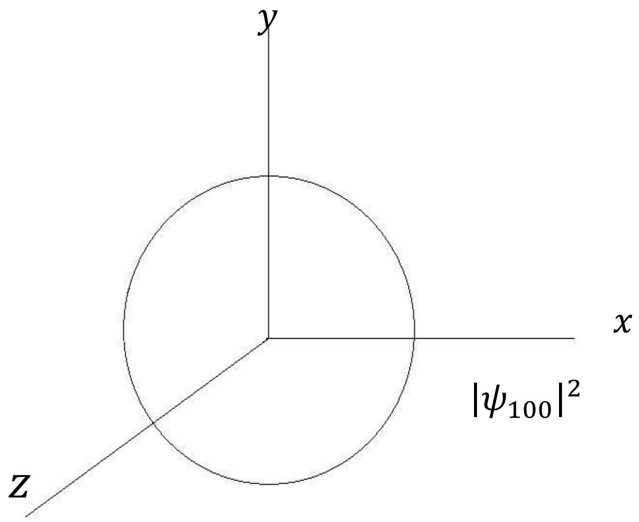


شكل (4-3)

التماثل الكروي لمربع دالة الاحتمال $|Y_{00}|^2$. حيث لا تعتمد كثافة الاحتمال على الزاويتان θ و ϕ.

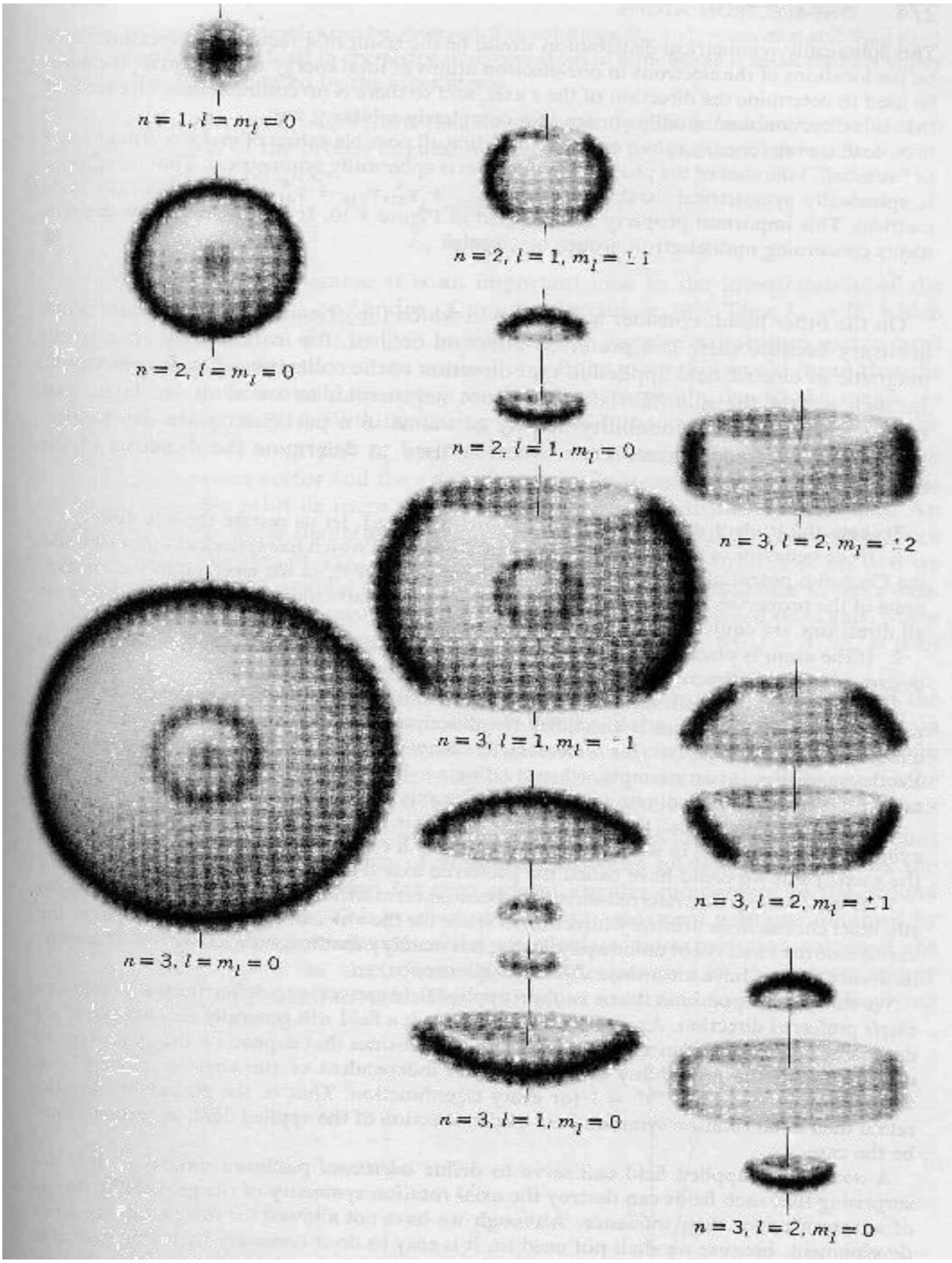
يوضح الشكل (4-4) توزيع كثافة الاحتمال النهائية, حيث شكل التوزيع كروي متناظر في ثلاث أبعاد. والشكل (4-5) يوضح توزيع دالة كثافة الاحتمال لمجموعة من الأعداد الكمية المختلفة في ثلاث أبعاد.

إذا كنت قد فهمت هذا الجزء, فأنك لابد أن عرفت لماذا كان عنوانه (بزوغ ميكانيكا الكم أو نهاية ذرة بور). هذا لأنه يتبين لنا الآن كم كانت نظرية بور مفرطة التبسيط لوصف سلوك الإلكترون رغم نجاحها على الذرات وحيدة الإلكترون. إن شكل إلكترون يدور في مدارات دائرية أو بيضاوية لم يعد صحيحا بالنسبة لنا الآن, بل كل ما يمكن أن تفعله تلك المدارات هي أن تظهر كواحدة من تلك الاحتمالات العديدة الموجودة في الشكل (4-5), عندما تتخذ أعداد الكم الأربعة قيما معينه.



شكل (4-4)

التماثل الكروي لمربع دالة الاحتمال لإلكترون ذرة الهيدروجين في الحالة الأرضية $n = 1$ و $l = 0$ و $m = 0$, حيث يظهر التوزيع ككرة متماثلة في كل الاتجاهات.



شكل (4-5)

توزيع دالة كثافة الاحتمال $|\psi_{(r,\theta,\phi)}|^2$ لمجموعة مختلفة من أعداد الكم في ثلاث أبعاد. هنا $m_l = m$ و z هو المحور الرأسي. يجب أن تتخيل دوران الصور هنا حول المحور z, وذلك لتمثيل الشكل في ثلاث أبعاد.

هامش الفصل الرابع

[1] كان يعتقد في السابق أن الضوء ينتشر في وسط أطلق عليه اسم الأثير. لكن تم التأكد تجريبيا فيما بعد على عدم وجوده. فالضوء ينتشر بسرعة ثابتة في الفراغ, دون الحاجة إلى أي وسط.

[2] قد يكون هذا الجزء صعب بعض الشيء لمن يقرأ ميكانيكا الكم أول مرة, لذلك لا بأس بقراءته أكثر من مرة, والرجوع إلى مصادر أخرى حتى يفهم بشكل جيد.

القسم الثانـي

ما بعد ميكانيكا الكم (الأبعاد الفلسفية للنظرية)

الفصل الخامس

بداية الأزمة

مقدمة

لم تكن اكتشافات ميكانيكا الكم الحديثة إلا بداية لصراع طويل لم ينته حتى الآن, فمبدأ عدم اليقين قد قضى تماما على صورة الكون الآلية الحتمية, ومن جهة أخرى قضت معادلة شرودنغر على النموذج النقطي للجسيمات الذرية, وأدخلت تلك الجسيمات في وصف رياضي تجريدي بحت في الدالة العقدية ψ. بعد ذلك أتى ماكس بورن وأربك الوضع أكثر عندما أعلن بأن مربع الدالة العقدية ψ ليس سوى احتمال تواجد الجسيم في نقطة معينة في الفضاء عند زمن محدد.

في الحقيقة كان التفسير العميق لتلك الاكتشافات الحديثة بداية لإعادة إحياء الجدل العنيف القائم حول نظرية المعرفة والانطولوجيا بين الفلاسفة, ولكن بصورة بشكل أكثر جاذبية. في السابق كانت أفكار الفلاسفة تطبخ في رؤوسهم ثم تقدم إلى العالم, لكن الآن تطبخ الأفكار في المختبرات ثم تقدم إلى العالم, وشتان بين هذا وذاك.

في هذا الفصل سوف أتناول في البداية تجربة ذات الشقين, والتي كان لها الأثر الأعظم في إثارة البلبلة الفكرية في الفيزياء الحديثة. بعدها سنقوم بعرض أراء تياران أو مدرستان تسيران في اتجاهان متعاكسان في تفسير المكتشفات العلمية على الصعيد الفلسفي. المدرسة الأولى هي (مدرسة كوبنهاغن) ورائدها هو نيلز بور, المدرسة الثانية هي (المدرسة الواقعية أو العقلية) ورائدها هو اينشتين.

1-5 تجربة ذات الشقين

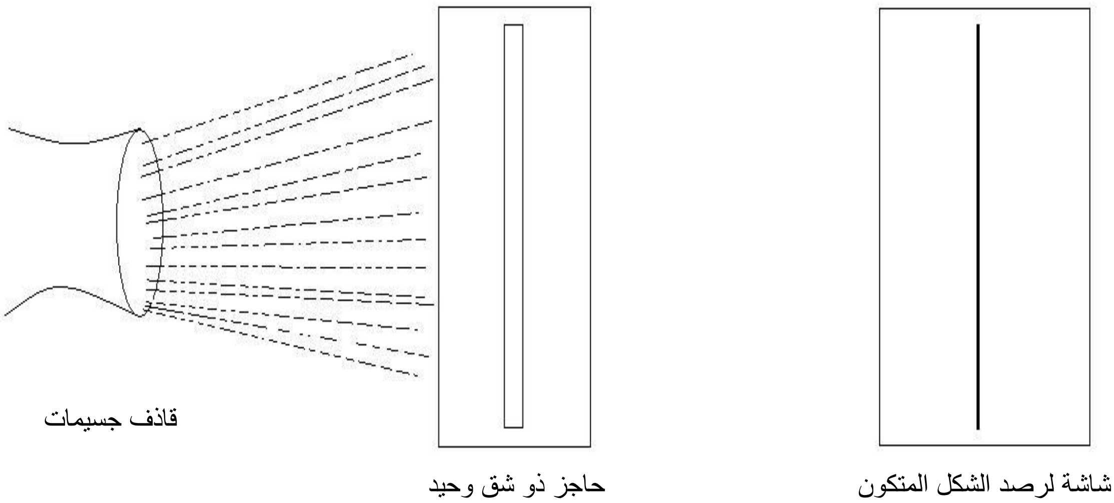
تصور بأن لدينا مدفع يقوم بقذف جسيمات كروية صغيرة باتجاه حاجز يحتوي على شق وحيد, ومن خلفه شاشة رصد, حيث تقوم بتشكيل الشكل الناتج من القذف كما هو موضح بالشكل (5-1). من الطبيعي جدا أن يتكون خط على شاشة الرصد, وهذا هو ما يحدث فعلا, وإذا قمنا بفتح شق آخر بجنب الشق السابق سنرى تكون خطين على شاشة الرصد كما في الشكل (5-2).

لنعد مرة أخرى إلى الشق الوحيد, ولكن بدلا من أن نرسل جسيمات مقذوفة, سنقوم بإرسال موجات ضوئية. في هذه الحالة سوف تتكون خطوط ضعيفة الشدة جدا على الأطراف و خط وحيد عالي الشدة في المنتصف, ذلك لان الشدة تكون أعلى ما يمكن في المنتصف, الشكل (5-3). نقوم الآن بنفس التجربة, لكن على الشقان معا, شيء ما مختلف سيحدث, عندما تصل الموجة إلى الشقان وتخرج منهما سيحدث تداخل بينهما interference, حيث تقوم الموجتان من كل شق ببناء بعضهما البعض في بعض المناطق, وهذا ما يسمى بالتداخل البناء interference construction, و في مناطق أخرى على الشاشة تقوم الموجتان بهدم بعضهما البعض, وهو ما يسمى بالتداخل الهدام interference destructive. يظهر الناتج الكلي على شكل خطوط سوداء وبيضاء, الشكل (5-4).

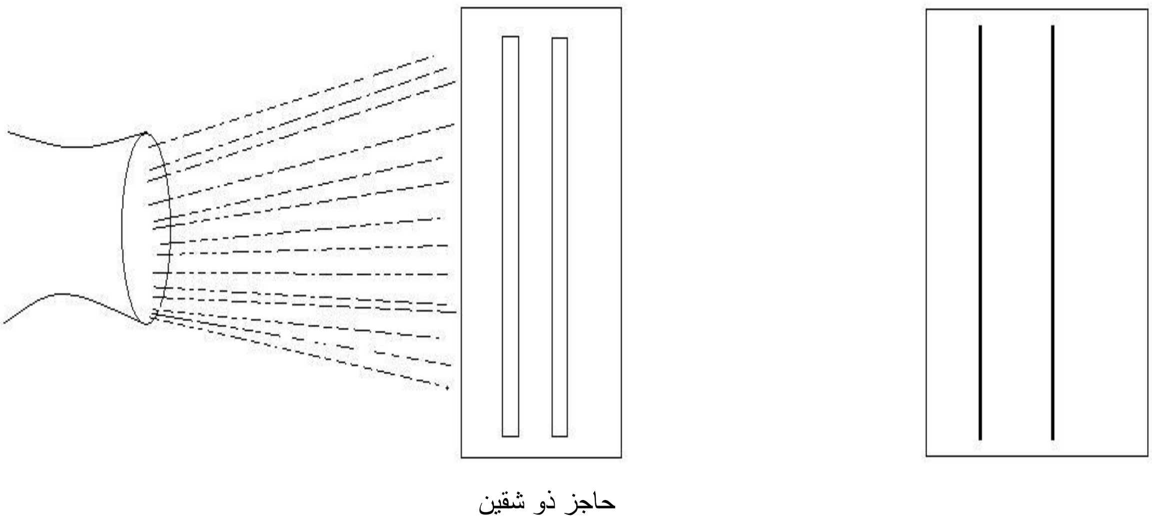
حتى الآن لا يوجد شيء لا معقول أو غير طبيعي. لكن عند الانتقال بنفس التجربة إلى حدود ميكانيكا الكم, حيث سنستبدل المقذوفات الكروية بالكترونات, سنرى اللامعقولية بعينها.

في التجربة الأولى سنرسل الالكترونات إلى الشق الوحيد, والناتج خط على شاشة الرصد. لا مشكلة في ذلك, لنقم الآن بفتح الشقان ونرى الناتج على شاشة الرصد. ربما نتوقع ظهور خطين على الشاشة, لكن ما يحدث هو ظهور نموذج التداخل, الشكل (5-4). في الحقيقة لا غرابة في ذلك إذا ما تذكرنا نظرية دي بروي التي تنص على أن الالكترونات ذات صفة مزدوجة, جسيمية وموجية. بذلك تكون الالكترونات شبيه بالفوتونات, و قد تصرفت و كأنها موجات ضوئية.

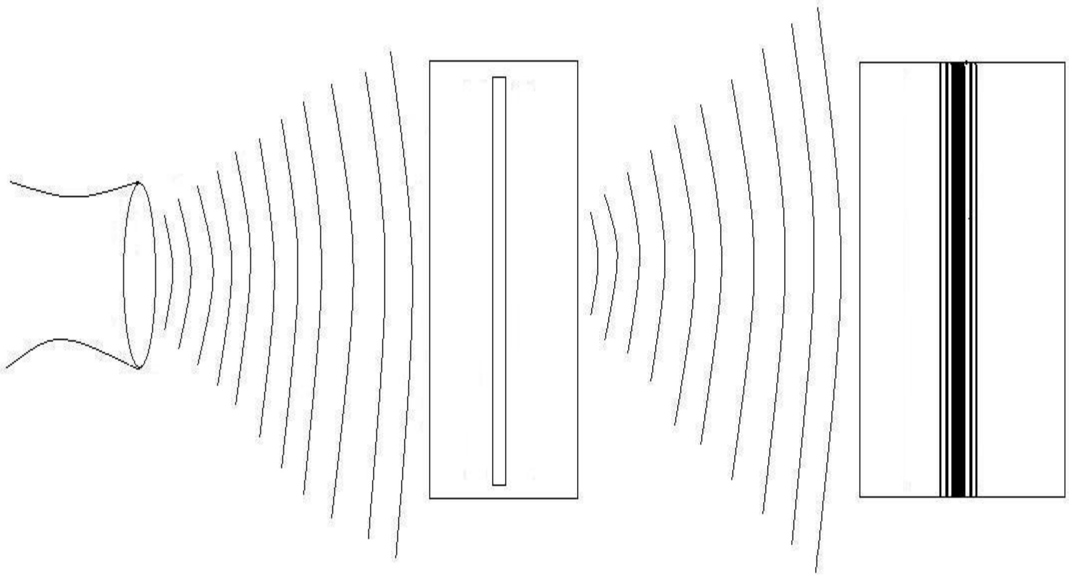
دعنا الآن نتحايل قليلا ونضعف شدة المدفع كثيرا حتى يصل إلى درجة إطلاق الالكترونات واحدا تلو الأخر. أي أن هناك فاصل زمني معين بين الطلقة والأخرى. ماذا نتوقع أن يحدث بعد مرور زمن كافي يمر فيه عدد كبير جدا من الالكترونات المنفصلة عبر الشقين؟ الجواب هو ظهور نموذج التداخل!!. هذا شيء عجيب حقا, عندما أرسلنا الالكترونات دفعة واحدة, وجدنا شكل معين على الشاشة وهو نموذج التداخل, وعندما أرسلنا الالكترونات الواحد تلو الأخر بفارق زمني معين وجدنا نفس الشكل. إن هذا الكلام مربك للغاية, فلو أرسلنا مجموعة من الأشخاص بدل الالكترونات لقلنا بأنهم قد اتفقوا فيما بينهم على أن يرتبوا أنفسهم بحيث يظهر نفس الشكل الذي كان عندما أرسلناهم دفعة واحدة. لكن هل الالكترونات تتفق فيما بينها لتعطي الشكل نفسه؟ هل تمتلك تلك الجسيمات وعي معين؟ بالإمكان إجراء التجربة بشكل آخر, نرسل الالكترونات المفردة إلى شق معين والأخر مغلق, سيتكون الشكل (5-1), ثم نفتح الشق الأخر, من المفترض أن يتكون الشكل (5-2) ولكن كما قلنا سيتكون نموذج التداخل, الشكل .(5-4) هنا تكمن قلب المشكلة, إذ كيف يمكن لحبات صغيرة تذهب إلى شق معين أن تتأثر بفتح أو بإغلاق


قاذف جسيمات
حاجز ذو شق وحيد
شاشة لرصد الشكل المتكون

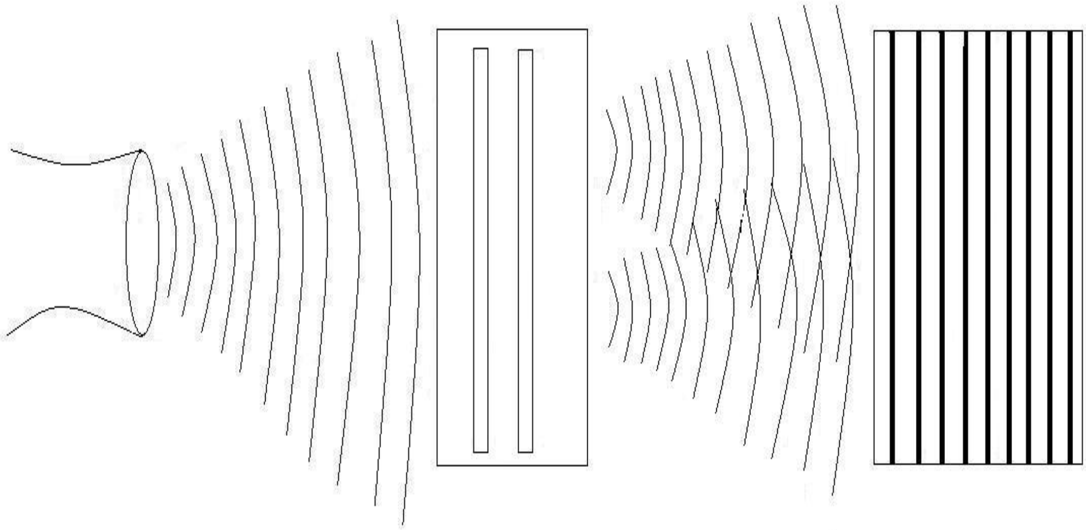
شكل (5-1)


حاجز ذو شقين

شكل (5-2)



شكل (5-3)



شكل (5-4)

الشق الأخر؟

رغم غرابة التجربة, فان الحس العام يقول لنا بأن الإلكترون المفرد يجب أن يمر من إحدى الشقين, إما الأيمن أو الأيسر. إذا كان الأمر كذلك فيمكننا معرفة الشق الذي سيمر منه الإلكترون, وذلك بوضع كاشف يراقب كلا الشقين. لكن ماذا عساه أن يكون ذلك الكاشف؟ لابد من استخدام ضوء في نهاية الأمر, لكن هنا نتذكر مبدأ الارتياب, فالضوء المكون من سيل من الفوتونات سيصطدم بإلكترون وليس بكرة سلة. أي انه سيؤثر على كمية دفع الإلكترون وموقعه, كما بينا ذلك سابقا. بمعنى أخر سوف نقوم بتغيير شروط التجربة, و بناءا على هذا التغيير, ستتغير النتائج من الشكل (5-4) إلى (5-2), أي أن ظاهرة التداخل تزول تماما إذا تمت مراقبة الإلكترون!!.

إذن كيف نفسر الآن ظاهرة التداخل عندما نقوم بإرسال الالكترونات فرادى الواحد تلو الأخر. إن الشعور العام يقول لنا بأن الإلكترون المفرد يجب أن يدخل من إحدى الشقين, وإذا دخل من إحدى الشقين يجب ألا يتأثر بوجود أو عدم وجود شق أخر والعكس صحيح. لكن ما رأينا أنه يتأثر بذلك, إن ظاهرة التداخل التي تحدثها الالكترونات الفردية يجب ألا تحدث إلا بوجود اقتران شيء ما بشيء أخر حتى لو أطلقنا الالكترونات فرادى. إذن لا يوجد أمامنا إلا تفسير واحد, وهو وجود موجة اقتران مع كل إلكترون مفرد. حيث يقوم الإلكترون لدى وصوله إلى الشقان بضربهما في وقت واحد بسبب طبيعته الموجية, لكن عندما يصل إلى الشاشة فأنه يصل كجسيم لا كموجة !

لكن هذا التفسير يبدوا و كأنه مزعج بعض الشيء, وربما أنه قد أزعج فيزيائي نظري مميز أراد تفسيرا أكثرا واقعية أو أكثر جمالا من التفسير السابق. لقد رأى أن تحدي الحس العام لتفسير هذه المعضلة يعطي نتائج أكثر واقعية من التفسير السابق. فأين المشكلة إذا قلنا أن الإلكترون لا يمر عبر واحد من الشقين الأيمن أو الأيسر فقط, بل يمر عبر كلا الشقين في أن واحدا!. في الحقيقة كان اقتراح مميز من فيزيائي مميز مرح يدعى ريتشارد فاينمان Richard Feynman.

5-2 تفسير فاينمان أو مقاربة ميكانيكا الكم

تحدى فاينمان الحدس العام المباشر الذي يرى وجوب دخول الإلكترون من إحدى الشقين, وادعى بدلا من ذلك أن الإلكترون يسلك كل المسارات الممكنة له في آن واحد, من لحظه خروجه من منبعه حتى وصوله إلى شاشة الرصد. بذلك يستطيع الإلكترون المرور من كلا الشقين في وقت واحد. كل مسار من هذه المسارات الممكنة للإلكترون يتم قرنها بعدد معين, ويكون متوسط هذه الأعداد مساويا لمربع تكامل دالة الموجة, أي المعادلة (4-4). لذلك كانت مقاربة فاينمان لميكانيكا الكم تعطي نفس النتائج التي تعطيها طريقة ميكانيكا الكم. أي طريقة إيجاد الدالة الموجية ψ من معادلة شرودنغر ومن ثم تكامل تربيعها في مدى معين. من الجدير بالذكر هو إمكانية استنتاج احد الطريقتين من الأخرى.

إن ما يشدد عليه فاينمان هو ضرورة التخلي عن التفكير التقليدي في مثل التجارب. فمن الخطأ أن نفكر بأن الإلكترون من لحظة صدوره من المنبع سوف يسلك مسار واحد محدد, وبالتالي

سوف يدخل من إحدى الشقين, كما لو كانت طلقة رصاص مثلا. لذلك يقول فاينمان في هذا الشأن:

(إن ما يحق لنا أن نتوقعه هو أن يؤدي فتح الثقب, في كل الأحوال, إلى مزيد من الضوء القادم إلى الكاشف, لكن هذا لا يحدث في الواقع. فمن الخطأ إذن أن نقول بأن الضوء يمر من هذا الطريق أو ذاك. ومازال يفلت مني أن أقول جملا من قبيل انه يمر من هنا أو من هناك, لكن من المهم أن تتذكروا أنني, بهذا القول, أقصد وجوب جمع السعات [الأسهم].)[1]

هناك طريقة رائعة قرأتها في أحد كتب ستيفن هوكينغ Stephen Hawking يشرح فيها كيف يمكن للإلكترون أن يسلك عدة مسارات في أن واحد. تخيل أنك وضعت قطرة حبر على ورقة, ثم بدأت هذه القطرة بالنزول إلى أسفل الورقة, ثم وضعت شق دائري صغير في الورقة بحيث تصطدم بها قطرة الحبر. ماذا سيحدث للقطرة؟ سوف تدور حول الشق من الجهتين. أي كما لو قد سلكت مسارين في وقت واحد. لكن هذا الكلام لا يحدث لو أنك قمت بدحرجة كرة بيسبول في فتحة.

يجب عليك الآن أن لا تتساءل لماذا إذن لا نرى عدة مسارات في الأجسام العيانية العادية. فلماذا مثلا لا نرى عدة مسارات للكرة عندما يقوم بركلها لاعب الكرة؟ كالعادة, السبب في ذلك هو إهمال تأثيرات نظرية الكم وثابت بلانك. كذلك عندما يتم اقتران عدد بكل مسار للكرة, فأن هذه المسارات تلغي بعضها البعض عدا واحدا منها, وهو المسار الذي تراه.

على الرغم من أن ميكانيكا الكم, ومقاربة فاينمان لميكانيكا الكم تعطيان تنبؤات إحصائية تتوافق مع التجربة, إلا أن تفسير هذه التجربة على الصعيد الفكري والفلسفي ظل غامضا جدا. إذ كيف يتسنى لإلكترون أن يسلك مسارين مختلفين في وقت واحد؟ بهذه الحالة أصبح يتواجد في مكانين مختلفين في وقت واحد!!.ثم لماذا يزول أثر التداخل عندما نضع كاشف لرصد الإلكترون من أي شق سيدخل؟ فهل الطبيعة تطوي أسرارها, كما يقول يقول فاينمان, بأنها:

(قد تدبرت أمرها جيدا بحيث تمنعنا من معرفة طريق عملها: عندما نضع أجهزة وظيفتها أن تتنبأ عن الطريق الذي اختاره الفوتون نحصل على الجواب المنشود, لكن مفعولات التداخل الرائعة تزول! وإذا لم نضع تلك الأجهزة, أي إذا تخلينا عن معرفة طريق الفوتون, فأن مفعولات التداخل تعود إلى الوجود! أليس هذا غريبا جدا!؟)[2]

فهل الإلكترون عندما يراقب يتصرف بشكل, وعندما لا يراقب يتصرف بشكل آخر؟ بهذه الطريقة يكون الإلكترون معتمدا على الراصد حتى يظهر على شكل معين. إن هذا ما تقوله لنا مدرسة كوبنهاغن بقيادة زعيمها بور. لقد أطلقوا على هذا التفسير اسم (انهيار الدالة الموجية) collaps of the wave function.

انهيار الدالة الموجية او تفسير مدرسة كوبنهاغن

اعتمدت مدرسة كوبنهاغن على تفسير انهيار الدالة الموجية لتفسير سلوك الإلكترون الغريب. تقول لنا تلك المدرسة بأن الدالة الموجية ψ تكون قبل عملية الرصد عبارة عن تركيب superposition من من مختلف الحالات, وعندما يتم تفاعل الراصد مع التجربة تنهار جميع

الحالات ما عدا واحدة وهي التي يرصدها الراصد. بمعنى آخر لا توجد الدالة الموجية ψ على حالة معينة قبل عملية القياس.

لتفسير سلوك الإلكترون الغريب اعتمدت مدرسة كوبنهاغن على خمس مبادئ أساسية, وهي:

1- أي نظام في المستوى الذري يوصف بالدالة الموجية ψ.

2- طبيعة النظام في المستوى الذري قائمة بالكامل على الإحصاء والاحتمالات.

3- ينص مبدأ الارتياب على عدم القدرة على معرفة جميع خصائص النظام في آن واحد. وحتى لو عرفنا معلومات عن متغير معين فأنه يكون بشكل احتمالي.

4- ينص مبدأ التتام على الطبيعة المزدوجة للجسيمات, فالجسيم الذري إما أن يظهر بشكل جسيم أو موجة, لكن لا يمكن أن يظهر على الهيئتين في وقت واحد.

5- ينص مبدأ المقابلة على وجود تطابق عام بين تنبؤات ميكانيكا الكم والميكانيكا الكلاسيكية في الحالات التي توصف بأعداد كمية كبيرة. أي أن الميكانيكا الكلاسيكية حالة خاصة لميكانيكا الكم.

بناءا على ذلك نستطيع تفسير تجربة ذات الشقين كالتالي: عندما يصدر الإلكترون المفرد من منبعه, نستطيع تصوره وقد خرج على شكل موجة, وعندما يدخل من كلا الشقين يتداخل مع نفسه, و إذا تداخلات كل الالكترونات المفردة مع نفسها, ينتج الشكل (4-5). لكن إذا قمنا بوضع كاشف عند الفتحتين, فأن الفوتون سوف يصدم الإلكترون مما يؤدي إلى تغيير حالته الأولى (الموجية) الى الحالة الثانية (الجسيمية), فيقوم الإلكترون بضرب الشاشة كجسيم, وبالتالي يظهر الشكل (2-5).

إن ملخص ما تقوله لنا مدرسة كوبنهاغن, هو عدم وجود حالة معينة قبل عملية القياس. فالقياس هو كل شيء في التجربة. لو تخيلنا بأن لدينا صندوق فيه إلكترون (نظام), ويوصف هذا النظام بالدالة ψ, فأن هذا الالكترون لا يكون لديه ψ محددة قبل عملية القياس, وبالتالي ليس لديه موقع أو كمية دفع أو طاقة أو أي متغير آخر قبل عملية القياس. بل كل ما يمكن تصوره هو وجود حالة تمازج من الدالة ψ, وفقط يزول هذا التمازج عند عملية القياس أو المشاهدة.

في الحقيقة يدخلنا تفسير كوبنهاغن في مشاكل عديدة على المستوى الفلسفي. فإذا كانت هناك علاقة مباشرة بين الراصد والمرصود, سوف يدخلنا ذلك في مشكلة علاقة الوعي بالوجود. إن الواقع لا ينشئ إلا عندما نحس به ونستحضره في أذهاننا. على الرغم من عدم صلاحية هذا القول على الأجسام الكبيرة, حيث تهمل التأثيرات الكمومية, إلا أن الأجسام الكبيرة ليست في النهاية سوى إلكترونات وبروتونات وكواركات.

هامش الفصل الخامس

[1] عجائب الضوء والمادة تجريبا وتأويلا, ريتشارد فاينمان, ترجمة: أدهم السمان (مؤسسة الكويت للتقدم العلمي, الطبعة الأولى, 1997).

[2] نفس المصدر السابق.

الفصل السادس

حرب المفارقات

1-6 قطة ليست بحية ولا ميته

فتح تفسير مدرسة كوبنهاغن لسلوك الإلكترون الحرب الفلسفية على مصراعيها, فكان أينشتين أبرز المعارضين لهذه المدرسة. في البداية أبدى انزعاجه من فكرة الاحتمالات, وقد عبر عن ذلك بجملته المشهورة (إن الله لا يلعب بالنرد). بعدها انزعج أكثر و أكثر من تفسير كوبنهاغن الخاص بانهيار الدالة الموجية, حيث يكون الراصد هو المتحكم فيما يحدث للتجربة من نتائج.

لكن أينشتين لم يكن الوحيد المنزعج من تفسير مدرسة كوبنهاغن. فيبدوا أن شرودنغر الذي وضع معادلة الحركة الأساسية في ميكانيكا الكم, كان هو الآخر منزعجا أيضا. لذلك وضع تجربة ذهنية عبر فيها عن رفضه لتفسير كوبنهاغن, وتعرف باسم (مفارقة قطة شرودنغر).

هب بأن لدينا صندوق مزود بغطاء, يحتوي على قطة ومادة مشعة وعداد جايجر (لرصد المادة المشعة) وغاز سام. في حالة تفكك المادة المشعة يقوم عداد جايجر برصد ذلك, وبعدها يعطي إشارة لإطلاق الغاز السام وتموت القطة. لنفترض بأن احتمال تفكك ذرة واحدة من المادة المشعة خلال ساعة واحدة هو خمسين بالمائة تماما. الآن, لو تركنا الصندوق لمدة ساعة, ثم قمنا بفتحه, فماذا سنتوقع؟ إن الحس العام يقول لنا, إما أن تكون القطة حية وعداد جايجر لم يلتقط أي شيء من المادة المشعة, وعليه فأن الغاز السام لم يطلق, أو يكون لدينا الاحتمال الأخر, وهو أن القطة أصبحت في عداد الموتى وأن عداد جايجر قد رصد تفكك المادة المشعة, وبالتالي أطلق الغاز السام.

ربما أراد شرودنغر من خلال هذه التجربة بيان التناقض الفكري الذي وقعت به مدرسة كوبنهاغن. فتفسير تلك المدرسة كما بيناه في السابق, يفترض بأن الذرات تكون في حالة تراكب من الدالة ψ, وتنهار جميع تلك التراكبات عند لحظة القياس ولا تبقى إلا حالة واحدة, وهي التي يشاهدها الراصد. لكن من المفترض أن هذا التفسير ينطبق على الذرات فقط, فهل ينطبق على القطط أيضا؟ أي هل ستكون القطة حية وميتة في نفس الوقت, وفي اللحظة التي يفتح فيها المراقب الصندوق تنهار حالات التراكب, ليمنح القطة الحياة أو الموت؟!!

ان جواب مدرسة كوبنهاغن هو نعم!!. إن النظام بكامله يوصف بتراكب الموجات طالما أنه مكون من ذرات. في هذه الحالة سيكون لدينا تراكب موجتين: الأولى (الذر لم تتفكك/ القطة حية) والثانية (الذرة تفككت/ القطة ميته). بناءا على ذلك تكون القطة ميته وحية بنفس النسبة والوقت. أي أنها قي حالة تراكب موجتي الحياة والموت:

$$\psi_{cat} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{alive} + \psi_{dead}) \qquad (6-1)$$

وكما قد انهارت الدالة الموجية الى جسيم عادي في تجربة ذات الشقين نتيجة فعل الرصد, فأن دالة القطة ψ_{cat} تنهار بعد فعل المشاهدة, ويزول تراكب الحالتين لترى ما ترى.

على الرغم من أن هذه التجربة الذهنية تبين مغالطة تفسير كوبنهاغن للحس العام, إلا انه يبدو بأن مدرسة كوبنهاغن لم تعد تأبه للحس العام كثيرا, وتصر على تراكب الحالات في كل شيء. فقبل عملية الرصد يكون الشيء مزيج من حالة وعكس الحالة. بكلمات أخرى, يكون الشيء قبل

عملية الرصد مزيج بين حالة ما وعدمها بنسبة 50:50% , وفقط عند الرصد (فعل المشاهدة) يزول تراكب الحالة ويستحيل إلى ما تشاهده.

2-6 حوار بين بور و أينشتين

أستطيع تلخيص أراء كل من بور و أينشتين حول ماهية ميكانيكا الكم, عن طريق تخيل الحوار التالي بينهما. يفتتح بور الحوار عن طريق السؤال التالي:

بور: إذا أردنا أن نحدد موقع إلكترون في ذرة ما في مداره, فماذا نفعل؟

اينشتين: نسلط عليه ضوء بطول موجي معين.

بور: هل سيكون الطول الموجي المستخدم طويل أم قصير؟

اينشتين: أعلم بما تفكر, وليكن طويل.

بور: إذن تريد التضحية بمعرفة موقع الإلكترون.

اينشتين: هذا متوقع منك, لنستخدم إذن طول موجي قصير.

بور: ستعرف الموقع ولكن ستضحي بمعرفة كمية الاندفاع.

اينشتين: إن مبدأ صديقك هايزنبيرغ الارتيابي, لا يروق لي كثيرا. أعتقد بأن فيه نقص ما. ألا تعتقد بأن هناك طريقة ما نستطيع من خلالها تحديد كل من الموقع وكمية الاندفاع في آن واحد؟

بور: لا أعتقد ذلك. عندما نسلط طول موجي طويل على الإلكترون, تنتظم موجة الإلكترون من جديد في بعد الطول الموجي للضوء المسلط. وعندما نستخدم طول موجي قصير (كمية دفع كبيرة) فأنك تعلم بأن هذا يؤدي إلى اندفاع عنيف للإلكترون, وبالتالي نفقد المعلومات عن كمية اندفاعه.

يصمت بور قليلا ثم يتابع كلامه

ربما تكون الطبيعة بهذا الشكل سخيفة ولا معقولة أبدا, ولكن ماذا نفعل؟. إنها ذات وجهين, موجي وجسيمي, يظهر إحدى الوجهين إذا توافرت له الشروط اللازمة. إنهما في النهاية وجهان لعملة واحدة, تظهر إحداهما في غياب الأخرى.

اينشتين: ومن برأيك يحدد تلك الشروط؟

بور: الراصد.

اينشتين: انك كمن يقول بأن الإلكترون ليس له موقع محدد قبل عملية القياس؟

بور: تماما.

أينشتين: وهل تعتقد بأن هذا يوافق الحس العام؟

بور: ومن قال لك بأنني أهتم بالحس العام. إن كل ما يهمني هو إيجاد معادلات رياضية تعطي نتائج تتفق بالنهاية مع التجارب. ولا أعتقد بأن معادلاتنا هي شيء ما مقدس موجود في ناموس كوني أو عالم أفلاطوني. إنها قابلة للتغيير على مر الأزمنة. إن جميع الخصائص المتغيرة للنظام في العالم الذري, ليست على حالة محددة قبل عملية الرصد. وحتى لو افترضنا جدلا بأنها توجد على حالة محددة قبل عملية الرصد, فأنك لن تستطيع وبأي طريقة كانت أن تعرف تلك الحالة دون أن تغيرها.

اينشتين: وماذا عن الخصائص الثابته كالكتلة والشحنة وكمية الدوران المغزلي؟

بور: كما قلت لك, إنني لا اهتم إلا بما نقول نحن عن الطبيعة. فكما نطلق عليها نحن اسم خصائص ثابته, نستطيع تصورها ثابته قبل عملية الرصد. انه تصورنا نحن, وهذا هو المهم عندي.

اينشتين: إذن كيف تستطيع أن تعيش في عالم لا تؤمن به بوجود قوانين السببية والحتمية؟ وأننا كمراقبين فيه, نؤثر فيه.

بور: إن ما أقوله ينطبق على عالم الكم فقط, لكن بالنسبة لعالمنا المرئي, فأن الطبيعة تعلم كيف تتدبر أمرها جيدا, حتى نؤمن بالسببية والحتمية وعدم تأثيرنا فيهما.

أينشتين: وفي عالم الكم؟

بور: عندها لن يكون هناك إلا قانون واحد , وهو عدم وجود أي قانون.

أينشتين: لا تدعنا نسبق الأحداث كثيرا, إن أهم ركيزة بالنسبة لكم, والتي تبنون فلسفتكم عليها هو مبدأ عدم اليقين. أود أن أقول لك بأنني أنا و بودولسكي $Podolsky$ و روزن Rosen, قد كتبنا نشرة تبرهن بأن الخصائص المتغيرة للجسيمات الذرية لها كميات متغيرة محددة قبل عملية الرصد. وهذا يبرهن بأن مبدأ الارتياب فيه نقص ما. إننا نصر على أن أي تجربة من شأنها أن تتناقض مع مبدأي الحتمية والسببية, إنما يكون ذلك نابعا بجهلنا في حقيقة الأمور. إنني أؤمن بوجود (عوامل خفية) $hidden\ variables$, ليست متضمنة في معادلات ميكانيكا الكم, وإذا ما أحطنا بشكل كامل بسير هذه العوامل, سنحصل بالتأكيد على الصورة الكاملة للعالم القائم على السببية والحتمية.

بور: ستكون أول أعمالي القادمة رؤية عملكم.

3-6 المدرسة الواقعية تهاجم بمفارقة أ. ب. ر $EPR\ paradox$

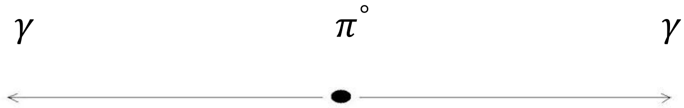
العام 1935, المكان, مؤسسة الدراسات المتقدمة بجامعة برنستون, نشر ثلاث رجال وهم أينشتين و بودولسكي و روزن نشرة بعنوان (هل يمكن أن تعتبر توصيف الحقيقة الفيزيائية المستمدة من ميكانيكا الكم توصيفا كاملا)[1]. كانت تلك النشرة تضم حجة منطقية بسيطة جدا, لكنها ماكرة للغاية. الهدف من وراء تلك التجربة إثبات إمكانية قياس متغيرين ديناميكيين في آن واحد. سيكون المتغيران هنا الموقع وكمية الدفع, وهذا بالطبع يخالف مبدأ عدم اليقين, كما بينا ذلك سابقا.

هب بأن لدينا في حالة سكون الجسيم المتعادل الشحنة π°. من المعلوم أن هذا الجسيم ينحل إلى فوتونيين يتحركان في اتجاهان متضادان كما هو موضح بالشكل (6-1). إن كمية الدوران المغزلي للبايون المتعادل تساوي الصفر. لذلك يجب أن يمتلك كل من الفوتون الأول و الثاني كمية دوران مغزلي متعاكسة, حتى نحافظ على مبدأ حفظ كمية الدوران المغزلي. مثلا, لو وجدنا أن الفوتون الأول لديه كمية تحرك مغزلي في الاتجاه العلوي على المحور x, فيجب أن تكون كمية التحرك المغزلي للفوتون الثاني إلى أسفل على نفس المحور.

هناك نقطة مهمة يجب معرفتها قبل تكملة المفارقة. في ميكانيكا الكم لا يمكن قياس كل مركبات أي قيمة ديناميكية متغيرة في نفس الوقت. مثلا, لو قسنا مركبة كمية الحركة لجسيم ما على المحور x, فلا يمكن عندها قياس أو معرفة مركبات كمية التحرك على المحاور الاخرى y و z. بالتأكيد السبب في ذلك, مبدأ الارتياب.

لنعد الآن إلى تجربتنا. إذا قمنا بقياس كمية الدوران المغزلي للفوتون الأول, سيؤدي ذلك مباشرة إلى معرفة كمية الدوران المغزلي للفوتون الثاني بدون قياسه. السبب في ذلك هو مبدأ حفظ كمية التحرك المغزلي الكلية. هناك نقطة مهمة في التجربة, وهي افتراض أن قياس كمية الدوران المغزلي لأحد الجسيمات لا تؤثر في أي حال من الأحوال على الجسيم الأخر, سواء كانت المسافة بينهما تقاس بالميكرومتر أو بالسنين الضوئية. من يوافق على ذلك يجب أن يوافق على التالي:

نقوم بقياس كمية الدوران المغزلي للفوتون الأول على المحور x, عندها سنكون غير قادرين على معرفة كمية الدوران المغزلي على المحاور الاخرى y و z. وهذا يوافق مبدأ الارتياب. بعدها نقوم بقياس كمية الدوران المغزلي للفوتون الثاني على المحور y, وبالتالي سنكون غير قادرين على معرفة كمية الدوران المغزلي على المحاور الاخرى x و z. الان, ان قياسنا لكمية الدوران المغزلي للفوتون الأول على المحور x يجعلنا قادرين على معرفة كمية الدوران المغزلي للفوتون الثاني على المحور x, بحسب مبدأ حفظ كمية الدوران المغزلي. بالمثل, إذا قمنا بقياس كمية الدوران المغزلي للفوتون الثاني على المحور y, سنكون قادرين على معرفة كمية الدوران المغزلي للفوتون الاول على المحور y.



شكل (6-1)

انحلال البايون المتعادل الى فوتونين يسيران في اتجاهين متضادين.

النتيجة من ذلك, هي إمكانية تحديد كمية الدوران المغزلي للفوتون الأول وكذلك الثاني على كلا المحورين x و y في نفس الوقت. هذا بالتأكيد يخالف مبدأ الارتياب, القائل بعدم امكانية قياس كمية الدوران المغزلي على كلا المحورين في نفس الوقت.

من تلك التجربة نخرج بالنتائج التالية: أولا: طالما أن قياسنا لكمية الدوران المغزلي لأي جسيم يجعلنا على علم بمقدار كمية الدوران المغزلي للجسيم الأخر, فهذا يعني أن الجسيم الأخر له كمية دوران مغزلي قبل إجراء أي قياس عليه. هذا يتناقض مع ما ذهب إليه بور, من عدم وجود أي قيمة محددة لأي كمية متغيرة قبل عملية القياس. ثانيا: تبين هذه التجربة إمكانية قياس مركبتان من كمية الدوران المغزلي في آن واحد. وهذا كما قلنا يخالف بشكل واضح مبدأ الارتياب. نستطيع بنفس الأسلوب أن نقيس موقع وكمية تحرك الفوتون في آن واحد. حيث نقيس موقع الفوتون الأول, وهذا يعطي بشكل مباشر موقع الفوتون الثاني, ونقيس كمية الحركة للفوتون الثاني, وهذا يعطي بشكل مباشر قيمة كمية الحركة للفوتون الأول. بذلك, حددنا كل من موقع وكمية الحركة لكل من الفوتونين في آن واحد. أخيرا: إذا كان هناك تأثير لحظي غير متموضع non locality بين الجسيمات, أي أن أحدهما يؤثر في الأخر بشكل مباشر أو آني, فهذا يخالف مبدأ النظرية النسبية الخاصة , الذي ينص على أن الضوء هو الحد الأعلى للسرعة في الكون. إن التأثير بين الجسيمات(إن وجد) يجب أن ينتقل بسرعة أبطئ من سرعة الضوء. أي يكون متموضع locality.

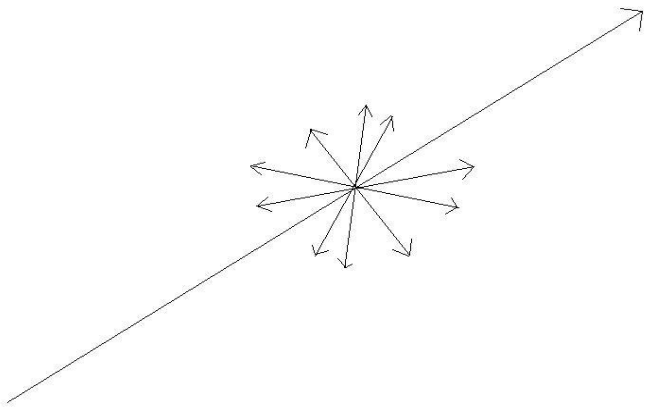
يا ترى هل يكون أينشتين ورفاقه على حق من هذه المفارقة؟ أليست التجربة منطقيا جدا؟ ألم يعتمدوا على قانون حفظ الطاقة, الذي يوافق عليه جميع الفيزيائيين بمن فيهم بور ورفاقه. لقد وضعت هذه التجربة الذهنية مدرسة كوبنهاغن في مأزق حرج جدا, استمر لمدة تسعة وعشرين عاما, حينها أتى الفيزيائي الايرلندي جون بيل J. Bell, ليعلن بأن المتغيرات الخفية الموضعية, إن وجدت, فستكون غير قادرة على إعطاء جميع نبؤات ميكانيكا الكم الإحصائية.

4-6 نظرية جون بيل أو أفيون أ. ب. ر

في عام 1964, نشر جون بيل مقالة بعنوان (حول مفارقة أ. ب. ر) وفيها يعبر عن أرائه عما ورد في تلك النشرة, بخصوص المتغيرات الخفية. يبدأ بل في مقالته بفرضيتان أساسيتان. الأولى, وجود قيم للكميات الفيزيائية لا علاقة للقياس بشأنها. الثانية, افتراض صحة علاقة التموضع. بمعنى أنه لا يمكن أن ينتقل التأثير بين أي جسيمان بشكل آني أو لحظي.

كانت الأفكار الواردة في نشرة أ. ب. ر, في البداية مجرد أفكار ذهنية. ما حاول بيل القيام به هو اختبار هذه التجربة فعليا. لذلك لم تنفذ هذه التجربة إلى في السنوات الأخيرة, بعدما تطورت التكنولوجيا بشكل كافي.

نعود الآن إلى البايون المتعادل الذي ينحل إلى فوتونيين لهما كمية دوران مغزلي متعاكسة, إن التجارب التي أجريت لاختبار مفارقة أ. ب. ر, لم تعتمد على كمية الدوران المغزلي للفوتونات, بل اعتمدت على كمية أخرى تسمى الاستقطاب polarization. يمكن وصف الاستقطاب بالنسبة للضوء باتجاه المجال الكهربائي في الفضاء. فعندما ينتشر الضوء (موجات



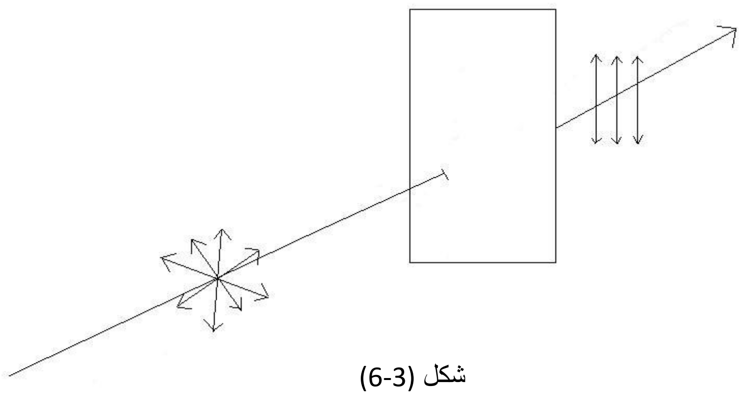
شكل (6-2)

تكون خطوط المجال الكهربائي عمودية على جهة انتشار الموجة الكهرومغناطيسية.

كهرومغناطيسية), تكون خطوط المجال الكهربائي عمودية على اتجاه انتشاره في كل الاتجاهات, كما هو موضح بالشكل(6-2). لكن إذا أردنا الحصول على خطوط مجال كهربائي تهتز وفق منحنى معين, نقوم بوضع ما يسمى (المقطب) polarizer. حيث يجعل هذا الأخير خطوط المجال الكهربائي تمر في منحنى خاص نقوم نحن بتحديده, كما هو موضح بالشكل (6-3). هذا هو مبدأ عمل النظارات الشمسية.

لنفترض الآن بأنه لدينا مصدر من البايونات المشعة للفوتونات, ولنفترض كذلك بأن كل واحد من الفوتونات المنطلقة له اتجاه استقطاب, إما إلى أعلى أوالى أسفل. نضع الآن مقطبين في طريق كل من الفوتونين المنطلقين. بحسب مبدأ حفظ الكميات, فأنه إذا ما علمنا عن حالة استقطاب أحد الفوتونين لدى وصوله إلى المقطب, سوف نعلم عن حالة الأخر بدون قياسه. مثلا, لو عبر الفوتون المتجه إلى المقطب (A) منه, فأننا نستنتج بأن الفوتون الذاهب إلى المقطب (B), سوف يعبر هو الأخر, بدون إجراء أي قياس عليه. وإذا لم يعبر الفوتون الأول من المقطب (A), فأن الفوتون الذاهب إلى المقطب (B) يجب ألا يعبر كذلك.

في البداية سنضع المقطبين بشكل متوازي مع كل من الفوتونين المنطلقين, كما هو موضح بالشكل (6-4).يوجد راصدان عند كل من المقطب (A) و(B), حتى يخبرانا بحالة استقطاب كل من الفوتونين المنطلقين بشكل متعاكس. في هذه الحالة ستكون نتائج كلا الراصدين متطابقة تماما. هذا متوقع, لأنه إذا كانت حالة استقطاب الفوتون المتجه إلى المقطب (A) عمودية, أي موازية لاتجاه المقطب, فأن الفوتون سوف يعبر, بهذا نكون قد علمنا عن حالة استقطاب الفوتون الذاهب إلى (B) قبل أن يقيسه الراصد الموجود هناك. حتى الآن يسير كل شيء بشكل جيد. نقوم الآن باستدارة المقطب (B) بزاوية 45° مع محور المقطب (A), كما هو موضح بالشكل (6-5).



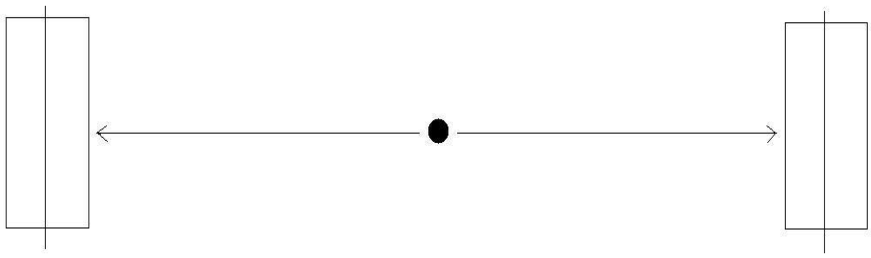
شكل (3-6)

استقطاب الضوء عند مروره داخل المقطب

الآن, إذا عبر الفوتون المتجه إلى المقطب (A), فأننا نكون قد علمنا بأن حالته قبل الوصول كانت عمودية, وبالتالي يجب أن تكون حالة الفوتون الذاهب إلى المقطب (B) أيضا عمودية, وبالتالي لن يعبر من المقطب, لان المقطب (B) مائل بزاوية 45° مع منحنى المقطب (A). لكن هذا ما افترضناه نظريا, إن التجربة تعطي نتائج أخرى! حيث سيجد الراصد الموجود عند المقطب (B) بأن نصف الفوتونات قد عبر, ونصفها الأخر لم يعبر؟!! أي أن هناك حالة تطابق بنسبة خمسون بالمائة بين نتائج الراصد (A) و (B)!. لماذا يمر بعض هذه الفوتونات ويمتنع بعضها الأخر؟ أليس من المفروض بأن لا يمر أي منها, لأننا قد علمنا عن حالتهما قبل عملية القياس.

كانت إحدى المحاولات الأولى لحل هذه المعضلة, هي افتراض وجود ترابط أو تشابك بين كل من الفوتونين أو المقطبين. لكن نتيجة هذا الحل هو اختراق مبدأ أساسي, وهو عدم وجود إشارة تنتقل بأسرع من سرعة الضوء. نحن نعلم بأن الفوتونين لهما سرعة الضوء نفسها, وبالتالي صدور إشارة من المقطب (A) في حالة وصول الفوتون إليه إلى المقطب (B) ليعلمه بأن الفوتون الخاص به قد عبر أو لا, ستكون أسرع بكثير من سرعة الضوء. وهذا كما قلنا يتناقض مع مبدأ فيزيائي أساسي, وهو أن سرعة الضوء هي الحد الأعلى للسرعة في الكون. ما هو الحل إذن؟

الحل هو أن بور ورفاقه كانوا على حق في ادعائهم بأن الكميات المتغيرة ليست لها قيمة محددة قبل عملية القياس. إن حالة استقطاب الفوتون الذاهب إلى المقطب (A) أو الذاهب إلى المقطب (B) ليس لها قيمة أو معنى محدد قبل الاصطدام بالمقطب. فحالة استقطاب الفوتون قبل أن يصطدم بالمقطب عبارة عن تراكب من عدة حالات. لذلك نستطيع افتراضا بأن حالة استقطاب

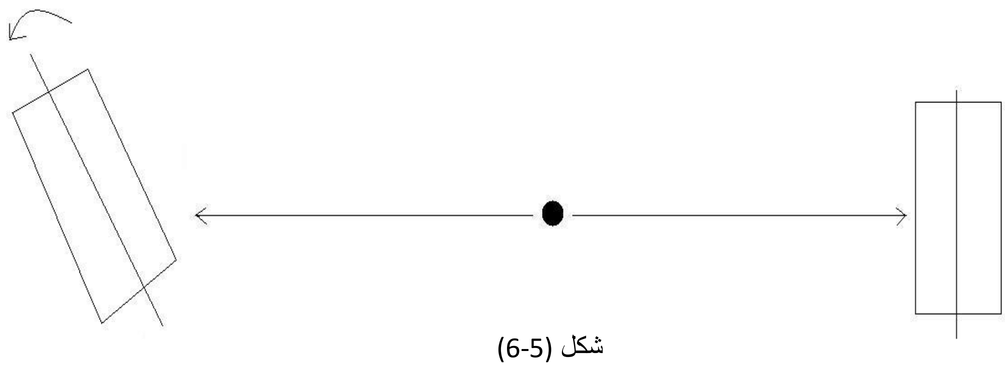


شكل (6-4)

يصدر المصدر المشع فوتونين متعاكسين, يذهبان إلى مقطبين في وضعية توازي مع اتجاه استقطاب كلا الفوتونين.

الفوتون قبل عملية القياس مكونة من موجتي احتمال, إحداهما موازية لمحور المقطب والأخرى عمودية عليه. الشكل (6-6). كل واحدة من هذه الموجتين لها شدة احتمال معينة, تكون هي المسؤولة عن احتمالية عبور الفوتون أو عدم عبوره. ففي الحالة الأولى, عندما كان اتجاه المقطبين متوازيان, شكل (6-4), كان سبب تطابق النتائج هو وضعية المقطبين نفسها. فوضعية المقطبين بشكل عمودي, يزيد من فرصة عبور موجة الاحتمال العمودية بشكل كبير. لكن هذا لا يعني بأنه في كل مرة سوف يعبر كلا الفوتونين, فهناك احتمال أيضا, ولكن ضئيل جدا بأن لا يعبر الفوتونين. لكن يبقى الترابط بين الفوتونين موجودا في كل عملية قياس. إذن يحق لنا القول, بأن الراصد هو المسئول عن تحديد ما إذا كان الفوتون سيعبر أو لا, وذلك عن طريق تحكمه بوضعية المقطب نفسها. لذلك عندما وضعنا المقطب (B) مائلا بزاوية 45° مع المقطب(A), أصبحت فرصة عبور كلا موجتي الاحتمال العمودية والأفقية متساوية, أي خمسون بالمائة لكليهما. وهذا يفسر لنا لماذا خرجت نصف الفوتونات وامتنع النصف الأخر عن الخروج. وهكذا إذا قمنا بزيادة درجة ميلان المقطب (B) بزاوية أكثر من 45°, ستتغير شدة الاحتمال بحيث تزداد فرصة عبور موجة الاحتمال الأفقية أكثر, حتى إذا ما وصلت زاوية الميلان إلى 90°, تصبح فرصة عبور الموجة الأفقية كبيرة جدا.

هل تثبت يا ترى هذه التجربة صحة رأي مدرسة كوبنهاغن, القائل بعدم وجود قيمة محددة للكميات الفيزيائية قبل عملية القياس؟. في الحقيقة لقد تقبل الفيزيائيين هذا الرأي الخيالي تدريجيا, وكثيرا منهم اليوم يعتنقون هذا الرأي, ويبدوا لي بالفعل أنه صحيح. لقد حاول أينشتين ورفاقه وضع تجربة لتثبت صحة رأيهم, ولكن يبدو أن السحر قد انقلب على الساحر, وباتت تلك التجربة أعظم دليل ضدهم.



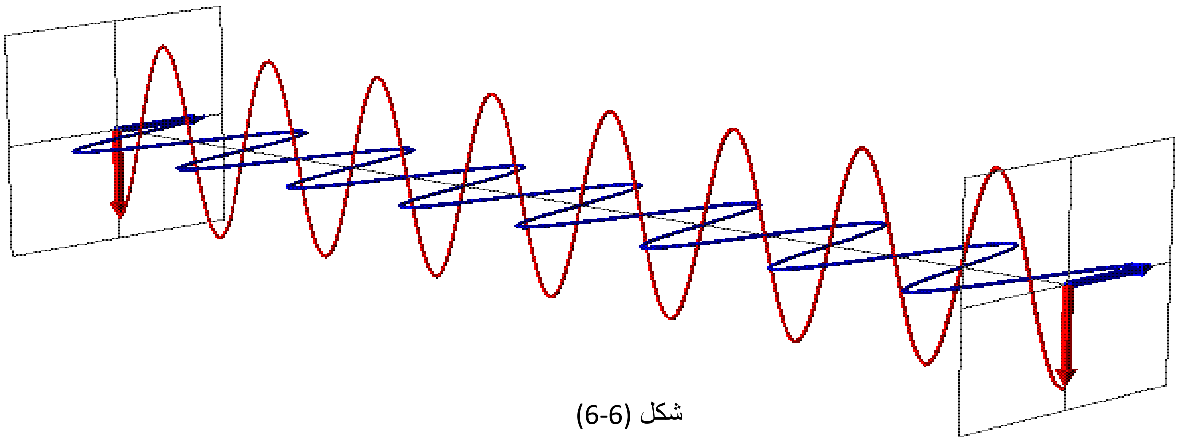
شكل (6-5)

ميلان المقطب (B) بزاوية 45° بالنسبة لمحور المقطب (A).

5-6 مفارقة صديق فغنر

تعتبر مفارقة صديق فغنر, امتدادا لمفارقة قطة شرودنغر. فقد وضعها الفيزيائي الهنغاري الأمريكي يوجين فغنر Eugene wigner, ليبحث بها في مسألة الامتزاج الحاصل في العقل قبل فتح الصندوق.

تصور أن فغنر جالس في مختبره مع صديقه, ثم أحس بالجوع وذهب ليأكل شيئا ما. بعد ذلك أراد الصديق, وهو بالتأكيد فيزيائي لامع, أي يسلي نفسه قليلا ريثما يعود فغنر. فقرر القيام بتجربة قطة شرودنغر. بدأ العمل, فوضع القطة والغاز السام والمادة المشعة وعداد جايجر في صندوق ثم أقفله, وانتظر لمدة ساعة حتى تتفكك المادة المشعة. بموجب تفسير مدرسة كوبنهاغن تكون القطة ليست بحية ولا ميته, بل فقط هي امتزاج بين هذا وذاك في عقل الراصد (صديق فغنر), وفي اللحظة التي يفتح بها الصندوق, يزول تراكب الحالات نتيجة الرصد,



شكل (6-6)

لا يكون استقطاب الفوتون على حالة محددة قبل إجراء قياس عليه. فهو مركب من موجتي احتمال, إحداهما موازية لمحور المقطب والأخرى عمودية عليه.

وتظهر القطة إما حية أو ميته. لكن مهلا, لقد خدع فغنر صديقه, فهو لم يذهب ليتناول الطعام, بل ظل يراقب صديقه والصندوق الذي يحوي القطة من نافدة المختبر. أي كأنه قد وضع صديقه في صندوق كبير وهو المختبر, وصديقه قد وضع القطة في صندوق صغير. هنا تبرز المفارقة, فبموجب ميكانيكا الكم, يكون رصد الصديق للقطة هو نفسه منشق الى قسمان في عقل فغنر, وهما (القطة ميته/الصديق حزين) و (القطة حية /الصديق سعيد). ينتج من ذلك السؤال المحير التالي: هل فغنر له تأثير على حياة أو موت القطة؟ إذا كان الصديق هو من قرر سلفا نتيجة لرصده موت أو حياة القطة, فلا يكون لرصد فغنر أي تأثير.لكن بموجب تفسير مدرسة كوبنهاغن, يجب أن تكون نتيجة رصد الصديق نفسها منقسمة إلى قسمان في عقل فغنر. بمعنى أخر, هل حالة القطة قد حددها صديق فغنر وانتهى الأمر, وأن فغنر يشاهد فقط ما حدده الصديق, أم أن الأمر يعتمد على رصد فغنر للاثنين؟

إحدى المشاكل في مفارقتي قطة شرودنغر وصديق فغنر تكمن في حدوث أحد الاحتمالين فقط, فالقطة بعد فتح الصندوق تكون إما حية أو ميته. لكن إذا ظهر أحد الاحتمالين, أين يذهب الاحتمال الأخر؟ تبدو الإجابة من وجهة نظر مدرسة كوبنهاغن, ومن وجه نظر عامة, بأن الاحتمال الثاني قد تلاشى. لكن هيو ايفيرت الثالث Hugh Everet III لا يعتقد ذلك, انه يأخذ ميكانيكا الكم بكامل حرفيتها, ويقول لنا بأن الاحتمالين حتى بعد فتح الصندوق (الرصد) يبقيان موجودين, لكن كل واحد منهما يظهر في كون مختلف!. إننا نعيش في عدد لانهائي من الأكوان المتوازية!!.

6-6 نظرية ايفيرت أو عدد لا نهائي من الأكوان المتوازية

لا أتصور أن هناك فيزيائي حقيقي يفكر في وضع نظرية مثل نظرية الأكوان المتوازية, دون أن يكون ورائها دافع قوي. هكذا وجد نفسه الفيزيائي الشاب ايفيرت الثالث مجبرا على وضع نظرية تفسر مفارقات نظرية الكم الساحرة, حيث يدخل الراصد والمرصود في وحدة واحدة غير متجزئة.

حتى نشرح نظرية ايفيرت, نعود الى صديق فغنر الذي يرصد حالة القطة داخل الصندوق. فكما قد بينا سابقا من تفسير كوبنهاغن, تكون القطة مزيج من حالات متراكبة ما بين الموت والحياة, وفقط في اللحظة التي يفتح بها الصديق الصندوق يزول تراكب الحالات, وتظهر إحدى الحالتين, الموت أو الحياة. يتفق ايفيرت مع كل ما تقوله مدرسة كوبنهاغن حول النقاط السابقة, ولكنه يختلف معهم في النقطة الأخيرة. فهو يقول بأن عملية الرصد لا تخلق حالة معينة وتزيل الأخرى, بل إن الحالتين معا تقعان!!.

هنا يحدثنا ايفيرت عن فكرته الجديدة, فعندما يقوم الصديق بفتح الصندوق, ينشق الصديق والصندوق إلى نسختين. بمعنى أخر قد يتم نسخ الكون إلى كونين, كل واحد من هذين الكونين يمثل نتيجة محتملة. لذلك سنجد في النسخة الأولى أن القطة حية والصديق سعيد, وفي النسخة الأخرى تكون القطة في عداد الموتى والصديق حزين.

ولكن ولله الحمد, كل نسخة في الكون لا تعي هذا الانشقاق. إذن نحن البشر في كل لحظة نفتح أو نتذوق أو نرى أو نشم أو نسمع شيئا ما, فأننا ننشق إلى عدد لا نهائي من الأكوان المتوازية. كل واحد من هذه الأكوان يمثل إحدى النتائج المحتملة للرصد.

لتوضيح الفكرة بشكل أكبر, تصور أنك جالس في مطعم و أمامك بيتزا من نوع معين. قبل أن تأكل البيتزا يكون في رأسك عدة احتمالات متوقعة لطعم البيتزا. لكن بمجرد أن تأكل البيتزا يزول هذا الامتزاج الحاصل في رأسك, وتبقى حالة واحدة, وهي التي تتذوقها. لكن ايفيرت يقول لك, بأنك سوف تنقسم إلى عدد من النسخ يساوي عدد الاحتمالات التي كانت في رأسك لطعم البيتزا قبل الأكل. أي أنك تتذوق جميع الاحتمالات التي كانت في رأسك في آن واحد! لكنك لا تعي إلا حالة واحدة, وهي التي تحس بها!!

<u>7-6 من العالم الجديد</u>

إذا كنت قد قرأت هذا الكتاب حتى هذا الحد, وفهمته بشكل جيد, فلابد أنك تشعر بشيء من الغرابة. وإن لم تشعر بذلك, فربما لأنك قد قرأت من مثل هذه الأشياء كثيرا ومللت منها, أو أننا قد فشلنا في تقديم صورة واضحة للنظرية. لذلك سأقوم بهذا الجزء الأخير من الكتاب بتلخيص أهم النتائج الفلسفية لنظرية الكم, حتى تتضح خلاصة القول.

كانت صورة الفيزياء حتى بداية القرن العشرين قائمة على الحس العام حول الحقيقة الموضوعية, بوجود العالم الخارجي, بغض النظر إن كان هناك من مراقب ما يقوم بعملية المشاهدة أو لا. فكل شيء في الكون قائم على السببية و الحتمية, وبفضل قوانين الفيزياء الكلاسيكية نستطيع التنبؤ بحركة أكبر المجرات إلى أصغر الذرات. إن الكون عبارة عن آلة عملاقة قد أطلقت للعمل, وليس للإنسان أي دور في هذه العملية. انه فقط جزء من تلك الآلة العملاقة.

لكن هذه الصورة لم تدم طويلا, فلقد تم اكتشاف ميكانيكا الكم في بداية القرن العشرين. ورأينا كيف زعزعت هذه النظرية مفاهيم الحس العام حول الحقيقة الموضوعية. لقد تحول الإنسان من مجرد جزء من آلة عملاقة إلى فاعل نشيط في هذا الكون, والفضل في ذلك يعود إلى مبدأ عدم اليقين, العمود الفقري لميكانيكا الكم.

ينص مبدأ عدم اليقين على عدم إمكانية القدرة على قياس كل من موقع وكمية تحرك لجسيم ما. وقد شرحنا الأسباب في الفصل الرابع. لكن علينا أن نفهم هذا المبدأ بشكل أوسع. إن قياسنا لكمية الحركة بشكل أكثر دقة, لا يعني أن الموقع موجود في مكان ما, ولكننا عاجزين عن تحديده. بل إن فكرة الموقع نفسها تصبح بلا معنى أصلا. في الحقيقة لا يطابق مبدأ عدم اليقين الحس العام أبدا. تصور بأن شخص ما يقول لك: سوف أتحرك الآن, لكن بدون أن يكون لي موقع!. أين سيتحرك إذن؟ لا شك بأن ذلك يشعرنا بتناقض عقلي صريح. هل تستطيع تصور شيئا ما يتحرك, لكن بدون أن يكون له موقع؟! يبدوا انه من العسير جدا أن نفكر في شيء كهذا. إذن كيف نبرر ذلك؟ نحن نعلم بأن مبدأ عدم اليقين صحيح تماما لنا اليوم, وقد أيدته التجارب كثيرا, وبدونه لا يكتمل صرح ميكانيكا الكم الرائع. لكن لماذا لا نستطيع التفكير فيه واقعيا؟ السبب في ذلك, هو أننا قد اعتدنا التفكير في عالم ذي ثلاثة أبعاد, تسير فيه الأجسام في زمن

تجري فيه اللحظات الزمنية بشكل متصل. فهل تذكر عندما شرحنا الدالة الموجية ψ في بداية الفصل الرابع. لقد رأينا بأن الموجة التي تصف الإلكترون لا يمكن تشبيهها بأي طريقة كانت بالموجات الضوئية أو الصوتية أو غيرها. فهي مجرد وصف رياضي تجريدي داخل الدالة الموجية ψ, والفضاء الذي تنتشر فيه غير واضح لنا. لذلك ان فكرة المكان المتصل ذي الابعاد الثلاثة, وفكرة الزمان الناتج من تتابع اللحظات, هما فكرتان مستخلصتان من التجربة الحسية. إن تطبيق هذان المفهومان على الواقع الذري, يجعلنا نشعر بتناقض عقلي صريح.

المبدأ الأخر الذي يشكل صورة العالم الجديد, هو مبدأ التتام, الذي تكلمنا عنه في الفصل الثالث. ينص هذا المبدأ على وجود وجهان للطبيعة, إحداهما جسيمي والأخر موجي, ولا يوجد في ذلك تناقض. فالطبيعتان متممتان لبعض, وقد ذكرنا مثال قطعة النقود, حيث لا يمكن مشاهدة الوجهان دفعة واحدة. إذا رأينا أحد الوجهين بكامل صورته فقدنا الأخر بكامل صورته, وإذا أردنا أن نشاهد الوجهان معا, علينا أن نضحي برؤية رديئة للوجهان.

من مبدأي عدم اليقين والتتام, تتضح لنا صورة العالم الجديد. إن الوجه الذي تظهر عليه قطعة النقود هو من اختياري أنا. هذا الكلام ينطبق على اختيار ظهور الطبيعة الموجية أو الجسيمية, وكذلك اختيار ظهور الحركة أو الموقع. إننا نختار الشيء الذي نريد أن نشاهده. إن ما ينطبق على الحركة والموقع, برأيي, يجب أن ينطبق كذلك على كل ما هو متغير في الطبيعة. فلا وجود لشيء على حالة محددة قبل عملية المشاهدة (الوعي). إن كل شيء خارج عن وعيك في هذه اللحظة لا يكون على حالة محددة. انه معلق في كل الاحتمالات. فكل ما في خزانة الملابس قبل فتحتها لا يوجد على حالة معينة, بل توجد عدة حالات ممكنة بشكل كامن. وفقط يزول هذا التمازج عند فتح الخزانة, وتظهر إحدى الإمكانات العديدة. و هذا ما أطلق عليه اسم (انهيار الدالة الموجية).

إن الإنسان لم يعد ذلك الكائن المغلوب على أمره كما صورته الفيزياء الكلاسيكية. ولم يعد الكون بالكامل قائم على السببية والحتمية, كما تصور فيزيائيوا ما قبل الكم. إن عقولنا تلعب دور رئيسي في تشكيل وترتيب الطبيعة الجميلة التي نراها, وذلك عندما يقوم الوعي بتحويل الواقع المتراكب إلى الحقيقة التي نراها ونحس بها. إن ميكانيكا الكم لا تنكر مبدأي السببية والحتمية بشكل مطلق, ولكن ترى بأن لهما حدود في العالم الكوانتي. كذلك لا تقدم ميكانيكا الكم حل رسمي حول مشكلة (العقل – الجسد), على الرغم من انه توجد اليوم محاولات لا بأس بها لحل تلك المشكلة عن طريق نتائج ميكانيكا الكم, لكنها تعطينا علاقة الوعي بالواقع إلى حد ما. ان العالم كما تصوره لنا تلك النظرية بالنسبة للوعي, مثل الصخرة الكبيرة بالنسبة للنحات, فالصخرة تحمل عدد لا متناهي من الأشكال في نظر النحات, وله الحرية في اختيار أحد تلك الأشكال. بالمثل يحمل العالم الخارجي عدد لا متناهي من الأشكال في نظر الوعي, وله الحق (الوعي) في تشكيل ما يريد.

هامش الفصل السادس

[1] مع القفزة الكمومية, فريدالان وولف, ترجمة: أحمد السمان, (دمشق: دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر, الطبعة الأولى, 1994).

المراجع

أولا: المراجع العربية

1- الدكتور فخري إسماعيل حسن, **مقدمة في الفيزياء الحديثة**, دار المريخ للنشر, 1993.

2- الدكتور محمد عابد الجابري, **مدخل الى فلسفة العلوم: العقلانية المعاصرة وتطور الفكر العلمي**, مركز دراسات الوحدة العربية, الطبعة السادسة, 2006.

ثانيا: مراجع مترجمة إلى العربية

1- رتشارد فاينمان, **عجائب الضوء والمادة تجريبيا وتأويلا**, ترجمة: الأستاذ الدكتور أدهم السمان, مؤسسة الكويت للتقدم العلمي, الطبعة الاولى 1997.

2- بريان غرين, **الكون الأنيق**, ترجمة: الدكتور عبدالحليم منصور /الدكتور نضال شمعون, مؤسسة الكويت للتقدم العلمي, الطبعة الاولى, 2005.

3- ناثان سبيلبرج / بريون د. أندرسون, **سبع أفكار هزت العالم**, ترجمة: د. محمد عبدالحمن جوهر, مؤسسة الكويت للتقدم العلمي, الطبعة الاولى, 2002.

4- ستيفن واينبرغ, **أحلام الفيزيائيين بالعثور على نظرية نهائية جامعة شاملة**, ترجمة: أدهم السمان, دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر, الطبعة الاولى, 1997.

5- ستيفن هوكنغ, **موجز تاريخ الزمن من الانفجار الأعظم الى الثقوب السوداء**, ترجمة: أدهم السمان, دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر, الطبعة الثانية, 1993.

6- بول ديفيس, **العوالم الأخرى صورة الكون والوجود والعقل والمادة والزمن في الفيزياء الحديثة**, ترجمة: ترجمة: د. حاتم النجدي, مراجعة د. أدهم السمان, قدم له: العماد مصطفى طلاس, دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر, الطبعة الثالثة, 2006.

7- فريدلان وولف, **مع القفزة الكمومية**, ترجمة: أدهم السمان, دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر, الطبعة الأولى, 1994.

ثالثا: المراجع الأجنبية

1- David J. Griffiths, **Introduction to Quantum Mechanics**, Prentice hall, 2nd edition, 2005.

2- Eisberg and R. Resnick, **Quantum Physics of Atoms**, Molecules, Nuclei and Particles, John Wiley, 2nd edition, 1985.

3- Stephen Gasiorowicz, **Quantum Physics**, John Wiley, 3rd edition, 2003.

4- Quantum mechanics Demystified, David Mcmahon, Mcgraw-Hill, 2006.

5- Kennth Kran, **Modern Physics**, John Wiley, 2nd edition, 1996.

6- Arthur Beiser, **concepts of modern physics**, Tata Mcgraw-Hill, Sixth edition, 2003.

7- Young & Freedman, **University Physics volume 3**, Addison Wesley, 11th edition, 2004.

8- Stephen Hawking, **Black Holes and baby Universes and Other essays**, Bantam Books, 1993.

رابعا: مراجع من الموسوعة الالكترونية الحرة ويكيبيديا Wikipedia

− *Schrodinger equation*.

2 − *Wigner's friend*.

3 − *Multiple universes*.

4 − *Boher − Einstein debates*.

5 − *Wavefunction collapse*.

6 − *Copenhagen interpretation*.

7 − *Bell's Theorem*.